

**TECHOS VERDES COMO ESTRATEGIA DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO
CLIMÁTICO EN LA CIUDAD DE PEREIRA**

**DIANA SOFÍA BELTRÁN TABARQUINO
LAURA TATIANA GALLEGU LÓPEZ**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
ADMINISTRACIÓN AMBIENTAL
PEREIRA, AÑO 2021**

**TECHOS VERDES COMO ESTRATEGIA DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO
CLIMÁTICO EN LA CIUDAD DE PEREIRA**

DIANA SOFÍA BELTRÁN TABARQUINO

LAURA TATIANA GALLEGO LÓPEZ

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE ADMINISTRADORAS
AMBIENTALES**

DIRECTOR

PhD. JUAN MAURICIO CASTAÑO ROJAS

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

ADMINISTRACIÓN AMBIENTAL

PEREIRA, AÑO 2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

OBSERVACIONES

FIRMA DEL DIRECTOR

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos Diana Sofía Beltrán Tabarquino

“Laudato si', mi' Signore”, por tu gracia abundante y fiel en mi vida.

Agradezco a mi familia de sangre por siempre impulsarme a volar alto e inculcar en mí el trabajo duro y honesto en favor de quien más lo necesita.

A mi familia por elección, aquellos con quien he construido comunidad, gracias porque a través de su alegría y bondad me han ayudado a darle sentido a mi existir.

A mis ángeles terrenales que me han brindado calor de hogar, felicidad y confían en mí para construir mano a mano un mejor futuro.

A la Universidad Tecnológica de Pereira, docentes y a mis compañeros, porque me brindaron aprendizajes únicos y maravillosos que marcaron mi vida.

Finalmente, esto es dedicado a mi amor eterno que está en el cielo, a mi inspiración y mi impulso para todo lo que me propongo, te amo más.

Agradecimientos Laura Tatiana Gallego López

En primer lugar, a mi madre y a mi abuelo porque sin su apoyo incondicional nada de esto sería posible, agradezco todos sus esfuerzos, por cumplir con su labor de la manera más desinteresada y con todo el amor del mundo, sin ustedes dos yo no sería el ser que soy hoy, esto es por ustedes y para ustedes.

A mi tía nana, mi abuelita y el gordo por alentarme y apoyarme siempre en cada paso que doy.

A Sofí por que más que una compañera se convirtió en familia, por las traspachadas, las sonrisas, el apoyo, por aguantarme la intensidad, por ser una amiga en todo el sentido de la palabra, por estar desde el día 1 hasta el último punto de este trabajo, Gracias.

A mis docentes que hicieron todo su esfuerzo para que este proceso de aprendizaje fuera excepcional y fueron inspiración.

Y a todas las personas que hicieron parte de mi paso por la Universidad, mil gracias siempre habrá un pedazo de ustedes en mí.

Resumen

El cambio climático es un problema al cual nos enfrentamos actualmente, y está atribuido a un conjunto de actividades humanas en las que se generan Gases Efecto Invernadero (GEI). Estos gases son los principales responsables del cambio en la composición de la atmósfera, favoreciendo así el calentamiento global y la aceleración del cambio climático. Dichos fenómenos traen consigo un sinnúmero de consecuencias que afectan tanto a la naturaleza, como a la economía y la salud de las personas.

Una de las actividades humanas que potencian dicho fenómeno y propician a su vez las olas de calor y las islas de calor urbano es la pérdida de espacios libres y verdes en las ciudades, las cuales afectan la calidad de vida de los habitantes de los centros urbanos, por este motivo se hace imperiosa la búsqueda de acciones que ayuden urgentemente no solo a mitigar dicho problema, sino a adaptarnos a él. Es por esto que, en el presente trabajo se propone evaluar la viabilidad del uso de techos verdes en la ciudad de Pereira como estrategia de adaptación al cambio y la variabilidad climática.

Palabras clave: Cambio climático, olas de calor, islas de calor urbano, techos verdes, adaptación.

Abstract

We are currently facing climate change due to a set of human activities that generate Greenhouse Gases (GHG), affecting the climate worldwide. These gases are the primary cause of the atmosphere's composition, thus favoring global warming and the acceleration of climate change. In addition, these phenomena bring with them countless consequences for nature, the economy, and people's health.

This phenomenon promotes heat waves and urban heat islands that affect the well-being of people in the cities. Furthermore, aspects such as urbanization with no open and green spaces worsen the situation. Therefore, this study evaluates the viability of using green roofs in the city of Pereira as a strategy for adaptation to climate change.

Keywords: Climate change, heat wave, urban heat island, green roofs, adaptation.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Justificación	5
1.3.1. Objetivo General	6
1.3.2. Objetivos específicos	6
2. MARCO DE REFERENCIA	7
2.1. Marco Conceptual.....	7
2.1.1. Cambio y variabilidad climática	7
2.1.2. Islas de calor urbano y olas de calor	8
2.1.2. Adaptación al cambio climático.....	10
2.1.3. Infraestructura verde	11
2.1.4. Sostenibilidad urbana.....	13
2.1.5. Gestión ambiental urbana.....	13
2.2. Marco Teórico	14
3. METODOLOGÍA	23
4. RESULTADOS	26
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	37
6. REFERENCIAS.....	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Soluciones basadas en la naturaleza como término general para enfoques basados en el ecosistema.	16
Figura 2. Servicios y beneficios de las infraestructuras verdes urbanas en un contexto de adaptación y mitigación frente al cambio climático.	18
Figura 3. Servicios ecosistémicos importantes para enfrentar el cambio climático.	19
Figura 4. Montaje piloto techo convencional	23
Figura 5. Montaje piloto techo verde.....	23
Figura 6. Resultado prueba t student en Excel.	27
Figura 7. Imagen comunas de la ciudad de Pereira priorizadas.....	33
Figura 8. Imagen zona urbana de Pereira y Dosquebradas. LANDSAT 8 5 de septiembre de 2019	34
Figura 9. Imagen satelital del Índice de Vegetación Ajustado al Suelo Modificado del casco urbano de la ciudad de Pereira.	35
Figura 10. Imagen satelital de temperatura superficial del casco urbano de la ciudad de Pereira.	36

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Datos resumen de la estadística descriptiva de las temperaturas y humedad relativa.....	26
Tabla 2.	Resumen criterios casos de estudio nacionales.....	29
Tabla 3.	Explicación importancia de selección.....	31
Tabla 4.	Matriz de selección tipo semáforo.	31

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1.	Variación de la temperatura ambiental y temperatura interior de módulos con techo normal y techos verdes.	27
Gráfico 2.	Variación de la humedad relativa ambiental y humedad relativa interior de módulos con techo normal y techos verdes.....	28

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático se ha convertido, en los últimos años, en uno de los problemas ambientales más desafiantes a los que se enfrenta la humanidad, debido a que en los últimos siglos se han presentado variaciones climáticas a un ritmo acelerado, producto de la intervención humana sobre el medio ambiente, a través de actividades como el consumo de combustibles fósiles, la ganadería intensiva, la deforestación, entre otros (Ministerio de ambiente, 2011). Estas actividades han generado cambios en la composición de la atmósfera, debido al aumento de GEI que han alterado el equilibrio energético en el planeta.

Las actividades humanas generan emisiones de cuatro GEI de larga permanencia, los cuales son el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O) y los halocarbonos (grupo de gases que contienen flúor, cloro o bromo), donde el CO_2 es el que ocupa una tasa de emisión del 56.5%, en relación con los demás gases (Díaz, 2012), siendo este el que más contribuye al cambio climático por causa del calentamiento global.

Según la ONU (2021), el planeta afrontó un aumento en la temperatura media anual de 1.2 °C para el año 2019, debido al ritmo acelerado con el que se está generando CO_2 en todo el planeta, motivo por el que se prevé que para el 2030 se alcanzaría una emisión de 56 giga toneladas de CO_2 , lo que produciría un calentamiento medio estimado de 3.2 °C, provocando así daños severos y costosos en todo el mundo. Para ello, la ONU (2021) planteó una solución para mitigar el calentamiento y los efectos del cambio climático, la cual consiste en reducir cada año a partir del 2020 un 7.6% las emisiones de CO_2 , con el fin de obtener para el año 2030 una emisión de 25 giga toneladas de este gas, logrando para este año un aumento de tan solo 1.5 °C en comparación a lo que se prevé si no se toman las medidas necesarias y oportunas para mitigar este problema.

Adicionalmente, dentro de los efectos del cambio climático se encuentran las sequías prolongadas, las enfermedades respiratorias, la pérdida de biodiversidad, la desaparición o alteración de los ecosistemas, el aumento de incendios forestales, el derretimiento de los glaciares, el aumento de catástrofes naturales, la escasez de alimentos por la desertificación de los suelos, entre otros (Ojea, 2018). Problemas que afectan no solo el medio natural sino también la economía y la salud de las personas, es por esto que es importante dejar de pensar que el cambio climático es un asunto ajeno y que solo le concierne a los gobiernos y a las empresas, ya que todos debemos hacer frente a este problema.

Por lo tanto, se puede afirmar que la humanidad se enfrenta a un desafío al cual debe responder de manera urgente, a partir de la búsqueda de estrategias y la toma de decisiones certeras que ayuden no solo a mitigar el problema, sino también a adaptarnos a él. Por ello, en este trabajo de grado se propone evaluar la viabilidad del uso de techos verdes en la ciudad de Pereira como estrategia de adaptación al cambio y variabilidad climática.

1.1. Planteamiento del problema

La creciente aparición de fenómenos climáticos a nivel mundial ha sido un tema relevante en la actualidad, lo que ha hecho que se deba ahondar en la búsqueda de estrategias que den posible solución a los impactos que estos, en el corto, mediano y largo plazo puedan tener tanto en las zonas rurales, como en las ciudades densamente pobladas. En Colombia el cambio climático

se ha considerado como un problema que compete netamente al sector ambiental y no como un reto que incide en el desarrollo económico y social, es por esta razón que en el país existen pocas investigaciones que permitan identificar realmente los problemas que este fenómeno acarrea y las que existen no se articulan al proceso de toma de decisiones en los sectores productivos y en los territorios, también se puede decir que la información que se obtiene no es de calidad y además en la mayoría de los casos es desconocida por los actores claves sectoriales y territoriales. Una gran consecuencia es el desconocimiento de las amenazas, la vulnerabilidad, y las dinámicas económicas y financieras derivadas del fenómeno de cambio climático por parte de los sectores y de los territorios. Hay que mencionar además que no existe articulación de las instituciones para planificar y desarrollar acciones que permitan hacerle frente a los retos que el cambio climático supone.

De acuerdo con el CONPES 3700, esta desarticulación trae como consecuencia pérdidas económicas y de competitividad, contribuye a que exista mayor vulnerabilidad y una baja capacidad de respuesta ante los diferentes eventos extremos que se presentan en las épocas secas y de lluvia en el territorio nacional. También, cabe resaltar que dentro de las políticas públicas no se proporcionan los mecanismos adecuados que posibiliten identificar las medidas de mitigación y adaptación que se requieren y de esta manera tener la capacidad institucional para planificar y ejecutar acciones que permitan la prevención de los impactos que estos fenómenos puedan generar. Lo anterior permite afirmar que en el país la institucionalidad aún no tiene la capacidad suficiente para abordar la problemática del cambio climático de manera integral, donde se involucren los sectores productivos, las autoridades territoriales y las comunidades locales.

En cuanto a la adaptación al cambio climático la información y las iniciativas a nivel nacional son limitadas e insuficientes, esta requiere el desarrollo de estrategias que articulen el nivel sectorial, nacional y territorial para de esta manera lograr una gestión combinada y coordinada, que permita la adecuada toma de decisiones. Todavía cabe señalar que, a nivel nacional según el CONPES 3700 no existe una estructura institucional donde los sectores y los territorios evalúen su vulnerabilidad y su capacidad para enfrentar los impactos, esto implica que la gestión del riesgo y la gestión ambiental no sean integradas adecuadamente y de esta forma permitan la formulación de estrategias de adaptación y mitigación frente al fenómeno del cambio climático. Cardona A. (2009), afirma que, Colombia tiene el reto de transversalizar el cambio climático con el objetivo de no perder una visión de país que responda a la multidimensionalidad del fenómeno, en este caso esta transversalidad “implica poner a Colombia en modo “adaptación” e integrar realmente las cuestiones del cambio climático, dentro de la cotidianidad del desarrollo del país, desde las políticas nacionales hasta las acciones locales”.

En consecuencia, a lo anterior, se presentan los Planes Departamentales de Gestión del Cambio Climático (PDGCC), los cuales buscan visualizar las posibles acciones que permitan mejorar las condiciones actuales del territorio frente al cambio climático en la búsqueda permanente de impulsar procesos de adaptación y mitigación. Para el contexto risaraldense, en el año 2013 la Gobernación y la Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER), iniciaron la

construcción de la primera fase del PDGCC. Dicho documento presenta como resultado específico los lineamientos estratégicos que guiarán la posterior estructuración definitiva del Plan, además concluye que el cambio climático representa una actual amenaza para los bienes y servicios ecosistémicos, así como para las formas de vida que se encuentran en el departamento, sin embargo, se han logrado conservar en gran medida unas buenas condiciones ambientales lo cual ha contribuido a que la situación no se torne mucho más crítica para Risaralda. Dentro de este plan, se presentan unos criterios que pueden ser utilizados para la revisión de los Planes de Desarrollo Municipales (PDM) en relación a la incorporación efectiva del cambio climático en la estructura de estos instrumentos-procesos, según el consolidado departamental, se pudo evidenciar que la situación de incorporación de la gestión del cambio climático en los PDM del departamento muestra una intención de los territorios de actuar frente a la variabilidad y al cambio climático, sin embargo aún es un tema abordado con una baja intensidad y coherencia (PDGCC, 2013).

En cuanto al PDM de Pereira (2016-2019) se puede afirmar que, cumple con los criterios de revisión propuestos en el PDGCC, excepto por las metas que no se encuentran planteadas concretamente para el cumplimiento del Plan en torno a la problemática ambiental, no obstante, se destaca el Programa “Variabilidad y Cambio Climático” que tiene como propósito contribuir en el avance de Pereira como un territorio más resiliente, menos vulnerable y compatible con el clima actual y futuro. Los esfuerzos de dicha administración se debían orientar en mejorar el conocimiento de las amenazas y las vulnerabilidades asociadas a la variabilidad y cambio climático, y de forma prioritaria avanzar en procesos de intervención contundentes que permitieran mejorar la capacidad de adaptación a escala rural y urbana. Por ello, se planteó el subprograma “Adaptación al cambio climático” que tenía como fin último, desarrollar actividades orientadas a la reconversión de sistemas productivos agropecuarios más resilientes, la promoción de la economía forestal, la transferencia de tecnologías para facilitar la adaptación de las comunidades urbanas y rurales y la siembra de árboles en la zona urbana con el fin de mejorar las condiciones de confort al interior de la ciudad.

La mitigación de la emisión de los gases de efecto invernadero (GEI), es una apuesta menor, ya que la misma administración municipal reconoció que no era una prioridad para el territorio debido a la baja tasa de emisiones GEI (0,46%) del país a nivel mundial. A pesar de esto, dentro del PDM se desarrolló el primer inventario que muestra la cantidad de GEI en el periodo comprendido entre 2016-2019, para las principales actividades generadoras que existen en el Área Metropolitana Centro Occidente, su publicación se realizó en marzo del 2021. A pesar de dichos esfuerzos, las acciones orientadas a la adaptación se centran en su mayoría en las actividades productivas agropecuarias desarrolladas en la zona rural y muy poco para las zonas urbanas que son las que albergan la mayor cantidad de población. Sin desconocer que la producción rural tiene impactos significativos en la calidad de vida de los habitantes del municipio, se hacen necesarias acciones específicas para la adaptación de las zonas urbanas a los efectos de los fenómenos climáticos extremos previstos. Lo anterior considerando que en la zona urbana existe un alto riesgo de configuración de islas de calor debido a su crecimiento acelerado que no se caracteriza por la creación de zonas verdes disponibles.

Aunque en la ciudad existe una tendencia positiva de arborización urbana, su distribución no es homogénea en todas las comunas. Según el informe del programa “Pereira Cómo Vamos”, para el año 2019, en la ciudad había un total de 68.070 árboles de los cuales el 32% son árboles grandes (más de 20 m de alto) y en promedio existen 6,9 habitantes por cada árbol, valor superior a los 3 habitantes por árbol recomendado por la Organización Mundial de la Salud OMS. Por otra parte, la CARDER asegura que el 22% de la superficie de la ciudad de Pereira se encuentra cubierta por bosques y para este mismo año fueron reforestadas 40 ha en el municipio. Lo anterior, sin embargo, no soslaya que en zonas como la comuna centro la presencia de parques y zonas verdes es mínima, o que zonas como alrededor del cerro El Chocho están siendo urbanizadas rápidamente con una pérdida evidente de árboles y guaduales.

En el PDM 2020-2023 se presenta una notable continuidad del PDM 2016-2019 en lo que se refiere a variabilidad y cambio climático, aquí se resalta la importancia de los corredores ambientales, la reforestación y el arbolado urbano. La administración municipal actual reconoce como problemática el insuficiente espacio de áreas verdes, donde las pocas áreas existentes se encuentran amenazadas debido a el otorgamiento de licencias en suelos de protección, el desconocimiento de la importancia de la biodiversidad urbana para el bienestar socio ambiental y la falta de un manejo integral de los corredores ambientales y corredores ecológicos del municipio. Concluyendo que, la población pereirana necesita más espacios verdes, la adecuación de corredores ecológicos y más parques para la conservación y disfrute.

El cambio climático es un proceso natural en este planeta, actualmente está fuertemente asociado a las actividades antrópicas, las cuales han acelerado el proceso de cambio en los patrones del clima a escala global (Alcaldía de Pereira, 2016). En el caso de Risaralda, los impactos previsibles del cambio climático para el periodo 2011-2040, según el IDEAM podrían estar asociados a aumentos de 0.8 °C en la temperatura media y de 18.26% en las precipitaciones promedio anuales. Según resultados del Plan de Acción Cuatrienal de la CARDER (2020-2023), el departamento de Risaralda tiene mayor vulnerabilidad y riesgo frente al clima, en múltiples dimensiones; la dimensión de recurso hídrico en cuanto a la reducción de la oferta hídrica en algunas cuencas abastecedoras, principalmente durante temporadas secas y en la de servicios ecosistémicos. No obstante, la mayor contribución a la vulnerabilidad está representada por la dimensión de hábitat e infraestructura, asociada al incremento de eventos extremos que pueden derivar en desastres y afectaciones a la salud pública, entre otros, mientras que, para el caso de riesgo, la mayor contribución está asociada a la dimensión de seguridad alimentaria debido a la pérdida de óptimos climáticos para algunos cultivos en varias zonas del departamento.

Por último, cabe resaltar que, el Grupo de Investigación de Ecología, Ingeniería y Sociedad (EIS) de la UTP ha realizado diferentes estudios donde, mediante el uso de imágenes satelitales e información climática, muestran diferencias en la temperatura superficial de la zona urbana de la ciudad de Pereira, lo cual ha demostrado la pertinencia de investigar acerca de la viabilidad del uso de techos verdes como estrategia de adaptación al cambio y variabilidad climática.

1.2. Justificación

A medida que las temperaturas del planeta aumentan, a causa del cambio climático, las ciudades presentan con mayor frecuencia fenómenos climáticos extremos tales como las olas de calor y las islas de calor urbano. Este problema se ha ido presentando en ciudades compactas, donde el espacio verde se ha ido reduciendo de manera significativa debido a la urbanización. Las olas calor y las islas de calor urbano son fenómenos que a nivel mundial acarrear graves problemas ambientales y de la salud pública, esto, ha ocasionado que la calidad de vida de los habitantes de las ciudades se esté viendo afectada; a pesar de esto, en países como Colombia poco se ha estudiado sobre la magnitud de estos fenómenos en sus ciudades y mucho menos se han explorado medidas que logren contrarrestarlos. En el ámbito mundial, se han realizado múltiples estudios que dan cuenta de nuevas alternativas para enfrentar estos fenómenos climáticos. Algunos de estos estudios, establecen, que la pérdida de espacios libres y verdes potencian el fenómeno y afectan la calidad de vida urbana. Lee et al., (2014), por ejemplo, aseguran que la “creciente urbanización ha traído como consecuencia una tendencia creciente en el aumento de las temperaturas causadas por emisiones antrópicas principalmente en las ciudades urbanas bajo el dosel urbano que conduce a cambios en la atmósfera ambiental de las superficies terrestres”.

Por otro lado, los impactos de dichos fenómenos ambientales extremos en los sistemas naturales y humanos se proyectan con un largo alcance y pueden afectar de manera grave a los sectores de la población más vulnerables física y económicamente. De manera general, Boche et al., (2019) afirman que el cambio climático puede acarrear consecuencias directas sobre la salud tales como incrementos en la mortalidad y morbilidad originada por la contaminación del aire y las olas de calor con mayor intensidad y duración; así mismo indirectamente hay repercusiones en los pronósticos sobre el incremento de transmisiones de enfermedades infecciosas por vectores, como resultado de ampliaciones de los límites geográficos y de la estacionalidad para los organismos vectores, sobre todo en las regiones del trópico y de zonas templadas menos protegidas, hasta afectaciones en la producción de alimentos y el suministro de agua potable. De la misma manera, se predicen aumentos de las enfermedades infecciosas no transmitidas por vectores, como consecuencia de altas temperaturas e inundaciones.

Es por lo que este proyecto busca evaluar la viabilidad de implementar techos verdes como estrategia de adaptación al cambio climático en la ciudad de Pereira. Desde el perfil de la Administración Ambiental se cuenta con la capacidad de gestionar y participar en proyectos de desarrollo ambiental, que permitan aportar a la mejora de la sostenibilidad del territorio y sus sectores económicos, mediante la innovación y adaptación a los nuevos requerimientos del orden mundial en favor de las futuras generaciones.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar la viabilidad del uso de techos verdes en la ciudad de Pereira como estrategia de adaptación al cambio y variabilidad climática.

1.3.2. Objetivos específicos

Determinar el desempeño de un techo verde en la regulación de temperatura a partir de la implementación de un montaje piloto.

Establecer criterios de selección para zonas de potencial aplicación de techos verdes.

Evaluar la viabilidad del uso de techos verdes en 3 comunas de la ciudad de Pereira a partir de los resultados obtenidos en los criterios de selección.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. Marco Conceptual

2.1.1. Cambio y variabilidad climática

Según la Convención Marco de las Naciones Unidas (CMNUCC), se define cambio climático al cambio del clima que se deriva directa o indirectamente de las actividades humanas, las cuales junto a la variabilidad natural del clima alteran la composición de la atmósfera mundial y que persiste durante un periodo de tiempo prolongado, decenios o períodos más largos (IPCC, 2007). De este modo, cualquier aspecto del clima, como la temperatura y la precipitación, sería modificado (Miller citado en Díaz, 2012). Desde el aspecto meteorológico se denomina cambio climático a la alteración de las condiciones predominantes, donde los procesos externos como la variación de la radiación solar, variaciones de los parámetros orbitales de la tierra, los movimientos de la corteza terrestre y la actividad volcánica son factores que tienen gran relevancia en el cambio climático (IDEAM, 2018).

Cabe señalar que el impacto de la actividad humana se ha acentuado durante los últimos siglos, generando unos efectos de alta intensidad en el sistema climático. Se debe agregar que, las emisiones de gases de efecto invernadero han aumentado desde la era preindustrial en su mayoría como resultado del crecimiento económico y demográfico, actualmente nuestro modo de producción y consumo energético está generando una alteración climática global que, ocasionará serios impactos sobre la tierra, la sociedad y la economía (Min ambiente, s.f.). Como consecuencia, se han alcanzado unas concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) sin precedentes en los últimos 800.000 años. Según el IPCC (2014) en los últimos decenios, los cambios en el clima han demostrado la sensibilidad de los sistemas naturales y humanos frente a este fenómeno, donde la elevación de la temperatura en el aire es el principal efecto disparador del mismo.

Por otra parte, la variabilidad climática se refiere a las variaciones en el estado medio y otros datos estadísticos del clima en todas las escalas temporales y espaciales, más allá de fenómenos meteorológicos determinados. La variabilidad se puede deber a procesos internos naturales dentro del sistema climático, o a variaciones en los forzamientos externos antropogénicos (IDEAM, 2018).

Dicho lo anterior, según el Montealegre (2009) citado en IDEAM (2018) la variabilidad climática presenta escalas temporales entre las cuales, las que se presentan a continuación son las de mayor importancia en la modulación y determinación de procesos atmosféricos:

- **Estacional:** Corresponde a la fluctuación climática a escala mensual. En latitudes medias, para la población de dichas regiones la secuencia de las estaciones de invierno, primavera, verano y otoño es algo común, pero en las latitudes tropicales, lo habitual es la alternancia entre las temporadas lluviosa y seca.
- **Intraestacional:** Se ha evidenciado que durante las estaciones existen perturbaciones que establecen las condiciones de tiempo durante decenas de días. La mayoría de las veces estas oscilaciones pasan inadvertidas porque su amplitud es pequeña, en comparación con las del ciclo anual. Dentro de las oscilaciones intra estacionales sobresale una señal de tipo ondulatorio, denominada de 30-60 días.
- **Interanual:** En esta escala se encuentran las variaciones presentadas en las variables climatológicas de año tras año. Ejemplos típicos de la variabilidad climática interanual corresponden a los fenómenos enmarcados dentro del ciclo El Niño - La Niña - Oscilación del Sur, ENSO y la Oscilación Cuasi Bienal.
- **Inter decadal:** En esta escala se manifiestan fluctuaciones del clima a nivel de décadas. La amplitud de estas oscilaciones es menor en comparación con la variabilidad interanual. Ésta es una de las razones por la cual la mayoría de la gente pasa por alto este tipo de variación (Pág. 16)

Finalmente, la diferencia entre el cambio climático y la variabilidad climática, radica en el tiempo en que se miden, por ejemplo, el tiempo meteorológico, al ser el estado presente de las condiciones atmosféricas en un determinado lugar, no puede ser analizado más allá de 10 días pues de lo contrario las predicciones comienzan a manejar alta incertidumbre. Cuando se habla de variabilidad climática generalmente se analizan las condiciones de la atmósfera durante períodos relativamente cortos y medianos de tiempo, uno o varios meses e incluso un año hasta dos décadas. Por otro lado, al estudiar el comportamiento de las variables climáticas durante un periodo de tiempo largo entre 30 años o más, y se comparan adicionalmente los promedios y extremos obtenidos contra los datos de series de otros periodos largos de tiempo se puede evidenciar si ha habido un cambio climático (IDEAM, 2018).

2.1.2. Islas de calor urbano y olas de calor

Las islas de calor urbano son un fenómeno térmico que se desarrolla en áreas urbanas debido a la diferencia de temperatura que existe entre las zonas más densamente pobladas y sus alrededores. Existen dos tipos de isla de calor urbano según Fernández (2009) citado en Moreno et al., (2016):

- Las islas de calor superficial, en las cuales existe una diferencia de temperatura entre las distintas superficies y materiales de construcción.
- Las islas de calor atmosféricas, señalan las diferencias térmicas entre el aire de las zonas urbanas y de las rurales. (Pág. 3)

Habría que decir también que las islas de calor son asociadas con el desarrollo urbano, debido a que el crecimiento de las ciudades da paso al reemplazo de las coberturas vegetales por

superficies artificiales, trayendo como consecuencia la reducción de la evapotranspiración que favorece la permeabilidad del entorno (NASA, 2015 citado en Soto, 2019). Existen múltiples factores que influyen en la intensidad de las islas de calor urbano como son la densidad constructiva, orientación de los edificios, el tipo de materiales de construcción usados y su comportamiento térmico y la disponibilidad de áreas verdes (Soto, 2019).

En los países en vías de desarrollo los impactos de las islas de calor urbano suelen ser mayores, esto se debe a que el crecimiento acelerado de las ciudades no es acorde con el crecimiento económico de las mismas, propiciando el aumento de la vulnerabilidad de sus habitantes ante los fenómenos climáticos de las islas de calor urbano y las olas de calor (Scott, 2006).

Por su parte el concepto de ola de calor se define como un “fenómeno meteorológico adverso, asociado a un período amplio en el que se produce una subida muy significativa de temperaturas estresantes en una vasta zona geográfica, que causa temporalmente importantes modificaciones en la forma de vida de las personas y crea condiciones adversas para la salud en ciertos grupos de riesgo de individuos” (Nimbus, 2001; Guevara, 2006, como se citó en Barcia, et al., 2021). Por otra parte, el IDEAM (2012) afirma que la ola de calor es “la secuencia o racha de varios días consecutivos en los cuales se han mantenido temperaturas máximas por encima de ciertos límites críticos, determinados como los valores correspondientes al tercil superior de la serie histórica”.

Sin embargo, según Páldy et al., (2005) citado en Barcia et al., (2021) “arribar a una definición estándar de ola de calor es difícil” adicionalmente afirman que “las olas de calor son eventos poco frecuentes, que varían en carácter e impacto aún en una misma localidad”. Adicional a lo anterior, el concepto de ola de calor lleva implícito el riesgo ocasionado por temperaturas anormalmente elevadas, es por esto que se puede caracterizar en dos factores: uno puramente climático, como es la superación de un determinado umbral térmico, que le confiere al registro concreto el carácter de extremo; el segundo hace referencia a los impactos negativos que estos fenómenos provocan sobre la población (Fernández et al., 2008)

En relación con la definición de Nimbus (2001) y Guevara (2006), anteriormente mencionada, existen factores característicos de las olas de calor que son fundamentales para diferenciarlos de otras connotaciones asociadas a la elevación de la temperatura, los cuales son:

- **Factor meteorológico:** Se refiere al incremento significativo de las temperaturas durante un período de tiempo amplio. Cabe resaltar que este fenómeno puede provocar la pérdida de vidas humanas, pérdida de materiales lo cual incurriría en afectaciones económicas significativas.
- **Factor espacial:** Supone que el incremento en la temperatura puede afectar grandes áreas geográficas incluso más allá de las unidades político - administrativas de menor nivel.
- **Factores socioculturales:** Reconoce que los cambios en los hábitos de los seres humanos en estos períodos deben ser significativos. Obviamente estos cambios tienen un carácter local y van a depender de cómo la sociedad esté preparada para soportar la elevación en las temperaturas.

- **Factores adversos para la salud:** Y por último se asegura que una ola de calor se vincula con una problemática específica de la salud humana, en este caso se deben de tomar precauciones y cuidados en grupos catalogados como individuos de alto riesgo como lo son adultos mayores, niños pequeños, personas con problemas respiratorios, etc. (Pág. 6)

De igual manera los autores afirman que deben darse los cuatro factores simultáneamente para que una elevación de temperatura sea considerada como ola de calor. Se debe agregar que la Organización Meteorológica Mundial-OMM (2015) propone que, para evidenciar cuantitativamente un evento de ola de calor, se deben caracterizar las siguientes métricas:

- **Magnitud:** esta debe ser procesada a partir de un índice o un cúmulo de índices que den cuenta de la condición térmica los cuales deben mostrar el umbral que va a permitir definir si se encuentra en una condición normal o extrema del evento.
- **Duración:** esta deberá permitir el cálculo de la insistencia de la ola de calor y debe dar cuenta del inicio y el final del evento.
- **Severidad:** Esta medida integra dos aspectos del evento, su magnitud y su persistencia.
- **Extensión:** Se calcula con el objetivo de indicar el área geográfica que ha sido afectada y la extensión espacial de la ola de calor.

En conclusión, no se establece un índice determinado para distinguir la manifestación del suceso por parte de la OMM, ya que ola de calor, como evento extremo del clima, ocurre durante la temporada cálida del año y su intensidad puede establecerse mediante un índice que analiza una sola variable meteorológica o mediante un índice que las combina (Barcia et al., 2021).

2.1.2. Adaptación al cambio climático

El cuarto informe del IPCC (2007) citado en Barton (2009) afirma que “la adaptación implica toda acción que signifique un ajuste de un sistema natural o humano como respuesta a efectos actuales o esperados de cambio climático o de sus impactos para moderar el daño o aprovechar oportunidades beneficiosas”. Ésta tiene como objetivo reducir riesgo y vulnerabilidades, buscar oportunidades y permitir que naciones, regiones, ciudades, sector privado, comunidades, individuos y sistemas naturales tengan la capacidad de enfrentar los impactos del cambio climático y así lograr implementar decisiones y acciones (Tompkins et al., Citado en CEPAL, 2015). En este sentido se hace necesario la integración de la adaptación en la planificación y diseño de políticas, y de esta manera, la adaptación logre contribuir al bienestar de los habitantes, el mantenimiento de los bienes y la seguridad de los activos, las funciones y los servicios ecosistémicos de hoy y el mañana (IPCC, 2014).

De acuerdo al Banco Interamericano de Desarrollo - BID (2010) los programas de adaptación y sus prioridades deben ser definidas por cada país, y a su vez deben enfocarse en cubrir el ciclo de vida de la adaptación, el cual implica la generación de escenarios, la implementación

de un sistemas de observación e información robusto y el análisis de vulnerabilidad y adaptación; se continúa con el establecimiento de ambientes propicios para la adaptación (a nivel de políticas, mecanismos de participación de la sociedad civil, la institucionalidad requerida, así como el establecimiento de mecanismos financieros para la misma); tras esto, se diseñan medidas estructurales y no estructurales que puedan ser consideradas buenas prácticas, teniendo en cuenta el ajuste de prioridades de proyectos, políticas, estrategias y medidas; y concluye con mecanismos para el monitoreo de las estrategias de adaptación adoptadas.

Pese a que cada país tiene circunstancias priorizadas individualmente, el BID (2010) plantea que la región de Mesoamérica a la hora de implementar medidas de adaptación debe tener en cuenta que existen puntos que pueden ser similares entre ellos, los cuales son:

- La adaptación debe ser considerada un proceso que requiere visión y acciones de corto, mediano y largo plazo; su implementación debe darse bajo un enfoque de “aprender haciendo”, y, por lo tanto, requerirá de ajustes y redefiniciones sobre la marcha.
- La adaptación se define como cualquier medida que esté orientada a reducir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia de los sistemas sociales y ecológicos y también los sectores económicos frente a los efectos adversos actuales y futuros del cambio climático. **(Pág. 76)**

Tal como lo explica Giddens (2009) citado en Lampis (2013), el concepto de adaptación es complejo en su abordaje, debido por ejemplo a que una cosa es la adaptación como consecuencia de patrones o eventos climáticos y otra es la adaptación que busca prevenir los impactos de estos eventos y/o reducir la vulnerabilidad de las poblaciones, tanto a escala temporal como al tipo de acción por promover. En este sentido de complejidad, se presenta una dificultad debido a que la adaptación no se da tan solo en los ecosistemas o frente a los efectos de los fenómenos, sino también en las dinámicas sociales, políticas y culturales.

Por último, de acuerdo con el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático - PNACC (2012) Colombia debe desarrollar la capacidad de identificar y aprovechar las oportunidades de negocios generados por un clima cambiante en la región, y así aumentar su competitividad, la cual ésta siendo afectada por la variabilidad y el cambio climático, un ejemplo de ello es la disminución de la productividad agrícola debido a la ocurrencia de incendios o inundaciones y que a su vez genera un incremento en los costos de producción, a causa de los costos de atención de desastres. De acuerdo con lo anterior las estrategias de adaptación deben ser locales, y a su vez vincular la participación comunitaria en el proceso de planificación y definición de las medidas que permitan lograr una adaptación más efectiva y duradera.

2.1.3. Infraestructura verde

La infraestructura verde como estrategia permite en el largo plazo que las ciudades se adapten paulatinamente al cambio y a la variabilidad climática. Ésta según Benedict y McMahon (2002) citado en Cohen-Shacham (2016) puede ser definida como "una red interconectada de espacios verdes que conservan las funciones y valores de los ecosistemas naturales y provee beneficios asociados a la población humana", y aunque desde 1900 se habla de este tipo de infraestructura, no es hasta la última década que toma fuerza sobre todo en la planificación de ambientes urbanos y periurbanos (Tzoulas et al., 2007; Eisenman, 2013. Citados en Vásquez, 2016). Así

mismo, la Comisión Europea (2014) citada en Magdaleno et al., (2018) afirma que la infraestructura verde comprende una “red estratégicamente planificada de zonas naturales y seminaturales de alta calidad con otros elementos medioambientales, diseñada y gestionada para proporcionar un amplio abanico de servicios ecosistémicos y proteger la biodiversidad tanto de los asentamientos rurales como urbanos”.

Según Farrugia et al., (2013) citado en Magdaleno et al., (2018) las infraestructuras verdes poseen una elevada capacidad para reducir los efectos negativos del cambio climático y la variabilidad climática en las zonas urbanas, periurbanas y rurales. En las ciudades, por ejemplo, ayudan a reducir el riesgo de inundación, proporcionan confort térmico y favorecen la agricultura urbana. Igualmente actúan como sumideros de carbono debido a la biomasa que las compone (Davies et al., 2011 citado en Magdaleno et al., 2018).

En la medida que la noción de infraestructura verde se ha aplicado progresivamente en entornos urbanos, su definición y lo que puede ser o no considerada infraestructura verde se ha ampliado, diversificado y complejizado. Actualmente se pueden encontrar múltiples manifestaciones materiales de este tipo de infraestructura, que tienen propósitos específicos diferentes, que varían en cuanto al nivel de tecnología incorporado y las escalas involucradas (Vásquez, 2016). En este sentido las infraestructuras verdes pueden constituir herramientas de elevada eficacia, aplicabilidad y viabilidad socioeconómica frente a la adaptación y mitigación climática. En cuanto a su aplicación a microescala se pueden encontrar techos verdes, jardines verticales y plazas. (Ibid.)

En relación con los techos verdes la Secretaría de Ambiente de Bogotá (2011) asegura que son “Un sistema constructivo que permite el mantenimiento sostenible del paisaje verde de la cubierta del edificio mediante la integración precisa de activos de intervención, vegetación seleccionada, medios de crecimiento diseñados y elementos atmosféricos”, para lograr esta integración, el Sistema debe cumplir seis funciones básicas: hermeticidad, drenaje, capacidad de retención de agua, estabilidad mecánica, nutrición y filtración.

Este tipo de cubiertas tienen incorporada vegetación que varía desde un jardín en la azotea con flores plantadas, arbustos, césped hasta parches de musgos y líquenes. Los techos verdes poseen en un sistema multicapa que incluye una capa superior de vegetación, suelo o un sustrato adecuado, capas de drenaje, protección, impermeabilización y aislamiento (Lee et al., 2013), entre los tipos de techos verdes más utilizados se encuentran:

- **Techos verdes extensivos:** Este tipo de techos generalmente se componen de una capa de suelo de 25 a 125 mm de espesor que soporta una variedad de plantas bajas, resistentes a la sequía y que cubren toda el área del techo.
- **Techos verdes intensivos:** Son jardines con una capa de suelo profunda para sostener árboles y arbustos, esta profundidad permite que el sustrato logre retener más agua.

Lee et al., (2013) agrega también que existen múltiples ventajas al incorporar un techo verde en una infraestructura que se encuentre en un área urbana, entre las cuales están:

- Moderar las temperaturas internas dentro de los edificios, proporcionando un escudo térmico para el sistema de techado y enfriamiento del edificio mediante la transpiración.

- Disminuir las escorrentías de aguas pluviales al interceptar y retener el agua lluvia, lo que reduce la tasa máxima de escorrentía, atenuando la presión en los sistemas de alcantarillado.
- Reduce la temperatura ambiente por enfriamiento evaporativo, lo que quiere decir que el agua absorbida por las plantas a través de la fotosíntesis y la transpiración se liberaría como vapor de regreso a la atmósfera.
- Mejoraría el valor de la biodiversidad proporcionando nichos de descanso para aves y animales pequeños.
- Puede reducir el uso de energía y reducir las emisiones de CO₂. (Lee et al., 2013)

2.1.4. Sostenibilidad urbana

La sostenibilidad urbana como principio lleva implícita la dimensión social, económica y ambiental. Ésta no consta de un significado uniforme, sino que varía según el entorno urbano al que se aplica de acuerdo con sus características ambientales propias, regionales y condiciones sociales o económicas (Lezama et al., 2006). Según Benton Short y Short (2008), el concepto central de sostenibilidad urbana es que las ciudades pueden ser ambientalmente sostenibles durante un tiempo relativamente largo. A su vez, National Science Foundation (2000) citada en Contreras (2017) afirma que “La sostenibilidad urbana es más práctica y funcional en un único sistema teórico que promueve la política pública urbana bajo la premisa de que la normalización de la producción de la ciudad devendría en un urbanismo sostenible. Aclarando ideas económicas y ecológicas de forma sencilla”.

De acuerdo con el Ministerio de Ambiente - MinAmbiente (2008) en Colombia “Las ciudades sostenibles se entienden como ciudades que integran aspectos ambientales, combinan el desarrollo económico y mejoran la calidad de vida y el desarrollo social de la población sin agotar los recursos naturales renovables, ni deteriorar el medio ambiente o el derecho de las generaciones futuras a utilizarlo para la satisfacción de sus propias necesidades”. Para complementar este concepto, en los Lineamientos Ambientales para la Gestión Urbano Regional en Colombia (2002) citados en MinAmbiente (2008), se manifiesta que la sostenibilidad de las ciudades debe ir más allá de las formas básicas de ocupar, producir y consumir en su espacio construido, por el contrario, es de suma importancia su relación con regiones con las cuales tenga un vínculo del que se obtienen insumos de energía y materia esencial para su reproducción sostenida y creciente.

2.1.5. Gestión ambiental urbana

La Gestión Ambiental Urbana - GAU, según Minambiente (2008) hace referencia a la gestión de los recursos naturales renovables, los problemas ambientales urbanos y sus impactos en la región o regiones aledañas. La GAU es una acción cooperativa entre actores públicos y sociales, se expresa en forma de políticas o planes sectoriales que se articulan con la gestión territorial, y que como resultado se relacionan o afectan el medio ambiente en el ámbito urbano regional. Es bajo este contexto urbano, que dicha Gestión Ambiental Urbana requiere un

esquema de gestión ambiental propio y ordenado, que tenga como objetivo una serie de acciones encaminadas. En el contexto urbano, la GAU implica un esquema propio y ordenado de gestión ambiental, orientado hacia un conjunto de acciones relacionadas con la máxima conservación, protección, defensa, y mejora del medio ambiente. Moreno (2008) afirma que “la gestión ambiental urbana implica un análisis de las ciudades con un enfoque sistémico, que permita evaluar sus elementos y procesos existentes, con el fin de determinar no solo los impactos de tipo ambiental, sino sus causas”. Adicionalmente plantea que, al concebir la ciudad como un sistema abierto, se ofrecen herramientas clave para solucionar los principales problemas ambientales que aquejan a las ciudades actuales.

En la GAU se hace fundamental la dimensión humana como una característica esencial puesto que la interacción del hombre en las ciudades configura aspectos sociales, culturales, psicológicos, económicos, sociopolíticos, entre otros. Finalmente, la estructura del sistema, sus componentes y los procesos de la ciudad, deben ser una prioridad para la GAU, de igual manera, el análisis de dichos procesos permite no solo conocer el impacto de estos, sino también sus causas, para que de esta forma se puedan diseñar y formular políticas y estrategias que conlleven a una gestión ambiental adecuada de la ciudad (Ibid.).

2.2. Marco Teórico

Con el fin de abordar las estrategias que combaten los impactos del cambio climático el IPCC (2007) asegura que, la mitigación y adaptación son aproximaciones que deben ser tratadas de manera complementaria e indivisible a la hora de intentar evitar estos impactos. La adaptación es vital para enfrentar las consecuencias del calentamiento global y actualmente emerge como uno de los temas más relevantes para los países y ciudades al enfrentar el cambio climático, sin embargo, si no existieran mitigaciones para aminorar dicho cambio, las condiciones resultantes podrían sobrepasar la capacidad de los sistemas naturales y humanos para adaptarse (Hamin & Gurrán, 2009 citado en Vásquez, 2016).

La estrategia propuesta en este proyecto de investigación, se enmarca en lo que se denomina “Soluciones Basadas en la Naturaleza” (SBN), las cuales hacen frente a retos trascendentales como el cambio climático, la inseguridad hídrica o alimentaria y la pobreza, dentro de estas soluciones se encuentran diversos enfoques como lo es la infraestructura verde, en este caso se hablará específicamente de los techos verdes, los cuales actualmente están siendo utilizados como una medida de adaptación y mitigación en diferentes países, sobre todo en las zonas urbanas.

En cuanto a las soluciones basadas en la naturaleza (SBN), la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza de la UICN las define como “acciones que deben ser protegidas y gestionadas de manera sostenible, que permitan restaurar ecosistemas naturales o modificados y aborden los desafíos sociales de manera efectiva y adaptativa, mientras se proporciona simultáneamente el bienestar humano y los beneficios de la biodiversidad” (Cohen-Shacham.

et al., 2016). Además de los principios tradicionales de conservación y gestión de la biodiversidad, el concepto SBN se centra principalmente en la integración de factores sociales como el bienestar humano y el alivio de la pobreza y el desarrollo económico, principios sociales y de gobernanza. Así mismo permite ayudar a las personas a adaptarse al cambio y los desastres, construir ecosistemas diversos y resilientes, a través de intervenciones sistémicas, eficientes en recursos y adaptadas localmente. Actualmente las SBN se configuran como una oportunidad para la innovación, y son promovidas por los formuladores de políticas y los profesionales como una forma rentable de crear una economía más verde, más sostenible y competitiva (Congreso Nacional del Medio Ambiente, 2018).

De acuerdo con la UICN las SBN se rigen por 8 principios fundamentales, los cuales son:

- Las SBN adoptan las normas y principios de la conservación de la naturaleza.
- Las SBN se pueden implementar de forma autónoma o integrada con otras soluciones a retos de la sociedad. Como, por ejemplo, las soluciones tecnológicas y de ingeniería.
- Las SBN se definen por el contexto natural y cultural único del sitio, incluido el conocimiento tradicional, regional y científico.
- Las SBN aportan beneficios sociales de un modo justo y equitativo que promueve la transparencia y una participación amplia.
- Las SBN mantienen la diversidad biológica y cultural y la capacidad de los ecosistemas de evolucionar con el tiempo.
- Las SBN se aplican a escala de un paisaje.
- Las SBN reconocen y abordan las compensaciones entre la obtención de unos pocos beneficios económicos para el desarrollo inmediato y las opciones futuras para la producción de la gama completa de servicios de los ecosistemas.
- Los SBN son una parte integral del diseño general de políticas y medidas o acciones que abordan desafíos sociales específicos.

Cabe resaltar además que, a pesar de que el concepto de soluciones basadas en la naturaleza es relativamente nuevo en la sociedad moderna, los pueblos indígenas han reconocido ancestralmente el papel fundamental que desempeñan los ecosistemas en el apoyo al bienestar humano. Sin embargo, la idea de servicios ambientales o ecosistémicos comenzó a establecerse en la literatura moderna hasta la década de 1970, más adelante en los 90 's se hizo necesario un enfoque más sistémico para comprender y documentar la relación entre las personas y la naturaleza. Posteriormente en la década de los 2000, surgió el término “Soluciones Basadas en la Naturaleza” el cual marcó un cambio de perspectiva pequeño pero relevante, debido a que las personas ya no eran únicamente beneficiarios pasivos de la naturaleza, sino que también podían proteger, gestionar o restaurar ecosistemas como contribución significativa y con propósito para abordar los principales desafíos sociales. De igual manera, este concepto permitió que se encontraran nuevas formas para mitigar y adaptarse a los efectos del cambio

climático lo cual posibilita la protección de la biodiversidad y la mejora de los medios de vida sostenibles (MacKinnon, K. et al., 2008 citado en Cohen-Shacham. et al., 2016).

Hoy en día se plantea la posibilidad de dar cumplimiento a los Objetivos de Desarrollo Sostenible -ODS- en su apartado de cambio climático a partir de las SBN. Según Raymond (2017) citado en Rinaudo (2019), “para lograr la efectividad de las estrategias relacionadas a adaptación y mitigación al cambio climático a partir de las SBN, se debe considerar ejecutar programas sistémicos e integrales, pues estas estrategias están estrechamente relacionadas”. Se debe agregar también que, para hacer frente a los desafíos actuales que se generan a partir del cambio climático, la UICN aborda un marco conceptual y metodológico internacional que permite potenciar las SBN mediante acciones que tienen como fin proteger y gestionar de manera sostenible, ecosistemas naturales o modificados a partir del enfoque de ‘adaptación basada en ecosistemas’ (ABE) como se puede ver en la Figura 1 y de esta forma, generar bienestar social y beneficios a partir de la biodiversidad. (Rinaudo, 2019)

Figura 1. Soluciones basadas en la naturaleza como término general para enfoques basados en el ecosistema.



Nota. Adaptado de soluciones basadas en la naturaleza, de Cohen-Shacham, et al., 2016, Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y los recursos naturales.

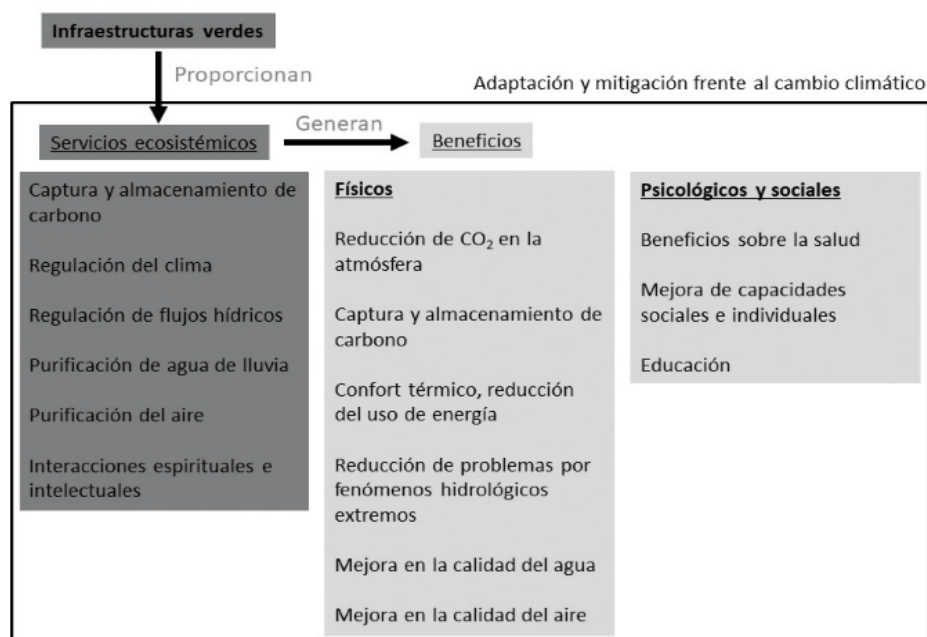
De acuerdo al enfoque de adaptación basado en ecosistemas, mencionado anteriormente, en el documento de Cohen-Shacham. et al., (2016) se logra una subclasificación de los enfoques que hacen parte de las SBN los cuales son los siguientes con sus respectivos ejemplos:

- Enfoques de restauración de ecosistemas: ingeniería ecológica, restauración ecológica y del paisaje forestal
- Enfoques específicos relacionados con el ecosistema: adaptación basada en ecosistemas, mitigación basada en ecosistemas, servicios de adaptación climática y reducción de riesgo de desastres basado en ecosistemas.
- Enfoques relacionados con la infraestructura: infraestructura natural y verde
- Enfoques de gestión basados en ecosistemas: gestión de zonas costeras y gestión integrada de recursos hídricos.
- Enfoques de protección: enfoques de conservación basado en manejo de áreas protegidas. **(Pág. 10)**

El presente trabajo se enmarca principalmente en los enfoques relacionados con la infraestructura, en este sentido, se tiene que el término infraestructura es definido como el stock de instalaciones y servicios necesarios para el funcionamiento de una sociedad (Krchnak et al., 2011 citado en Cohen-Shacham, 2016). Para la década de 1850 surgen los denominados cinturones verdes en el Reino Unido, los cuales a mediados de 1990 se comenzaron a definir conceptualmente como infraestructura verde. Este tipo de infraestructura como enfoque considera valores de conservación y acciones relacionadas con el desarrollo de la tierra, gestión del crecimiento y planificación de la infraestructura construida (Benedict y McMahon, 2002 citado en Cohen-Shacham, 2016). Se debe agregar que, el término de infraestructura verde es tan amplio que se abarca tanto como concepto y como herramienta práctica; a su vez se usa en el ámbito científico, teniendo aplicaciones especialmente en entornos urbanos (Tzoulas et al., 2007 citado en Cohen-Shacham, 2016), y también en el ámbito político en lo que se refiere a la gobernanza y los beneficios que se obtienen al vincular este tipo de estrategias al nivel adecuado de toma de decisiones ya sea estatal, municipal o individual (Wyborn y Pixler, 2013 citados en Magdaleno et al., 2018).

Por otro lado, Magdaleno et al., (2018) sugieren que la planificación y gestión de las infraestructuras verdes deben ser abordados desde una perspectiva integrada, donde los mecanismos de adaptación y mitigación climática puedan ser planteados desde los beneficios del uso de estas traducidos como servicios ecosistémicos del territorio en relación con diversas dinámicas espaciotemporales. (ver Figura 2)

Figura 2. *Servicios y beneficios de las infraestructuras verdes urbanas en un contexto de adaptación y mitigación frente al cambio climático.*



Nota. Adaptado de Infraestructuras verdes y azules: estrategias de adaptación y mitigación ante el cambio climático por F. Magdaleno, 2018, Revista digital del CEDEX.

Habría que decir también que, la infraestructura verde según Gill et al., (2007) citado en Vásquez (2016) contribuye de dos formas a combatir el cambio climático, en primer lugar, aumentando los niveles globales de resiliencia del sistema urbano-ecológico y por ende mejorar su posible respuesta a escenarios de alta incertidumbre, en segundo lugar, a través de la provisión de servicios ecosistémicos que permitan enfrentar aspectos específicos relacionados con el cambio climático. Dichos servicios ecosistémicos son clasificados generalmente conforme si actúan como mecanismos de mitigación o adaptación al cambio climático, en este sentido, la infraestructura verde posee estrategias de carácter multifuncional o multipropósito. En la Figura 3 se pueden observar los servicios ecosistémicos que se enfocan en la adaptación y mitigación al cambio climático. En relación con los de adaptación se tiene que, además de producir una disminución del consumo energético y el efecto moderador de las temperaturas del aire que tienen los espacios verdes, contribuye a disminuir los efectos negativos de las Islas de Calor Urbano (ICU). Otro aspecto beneficioso es la capacidad que tienen los ecosistemas de regular el ciclo del agua, esto implica mayor almacenamiento de agua en el suelo y subsuelo, lo cual contribuye a la disminución de la escorrentía superficial.

Figura 3. *Servicios ecosistémicos importantes para enfrentar el cambio climático.*

Mitigación	Adaptación
<ul style="list-style-type: none"> - Secuestro de carbono - Promoción de viajes sustentables - Reducción del uso de energía para calefacción y enfriamiento - Provisión de energía renovable - Provisión de materiales de construcción menos intensivos de energía - Producción de alimentos próximos a destinos de consumo 	<ul style="list-style-type: none"> - Mitigación del efecto de isla de calor urbana. - Almacenamiento de agua en el subsuelo, disminución del escurrimiento superficial y del riesgo de inundación. - Reducción de erosión del suelo. - fortalecimiento de la resiliencia de los ecosistemas al cambio climático. - Control de desborde de ríos y marejadas en zonas costeras.

Nota. Adaptado de Infraestructura verde, servicios ecosistémicos y sus aportes para enfrentar el cambio climático en ciudades: el caso del corredor ribereño del río Mapocho en Santiago de Chile por A. Vásquez, 2016, Revista de geografía Norte Grande.

Como se dijo en el apartado conceptual, en la actualidad existen varias manifestaciones materiales de este tipo de infraestructura, que tienen propósitos específicos diferentes, que varían de acuerdo con el nivel de tecnología incorporado y las escalas involucradas (Vásquez, 2016). A la microescala se pueden encontrar los techos verdes, los cuales han sido utilizados durante miles de años, este tipo de infraestructuras brindan una eficacia sustancial para los servicios ecosistémicos, incluida la regulación del microclima, la gestión de las aguas pluviales, la absorción de ruido, la purificación del aire y la provisión de hábitat para la vida silvestre (Lin et al., 2013). Sin embargo, para este mismo autor es necesario resaltar que, con diferentes climas, materiales vegetales y condiciones de construcción, la efectividad de estos tipos de infraestructura verde puede variar en los estudios realizados en Europa, América del Norte y otras regiones; por esta razón, múltiples investigaciones han concluido que es necesario realizar un estudio regional para demostrar los beneficios de los techos verdes en una zona específica.

Recientemente debido al creciente fenómeno del calentamiento global, lo que concierne a las emisiones de gases de efecto invernadero y al impacto del cambio en el uso de la tierra en la temperatura, especialmente el fenómeno de las islas de calor urbano, se han vuelto un tema relevante para las principales áreas metropolitanas de muchos países del mundo, puesto que estos fenómenos poseen efectos directos e impactos indirectos sobre la salud y la calidad del entorno de vida de los residentes urbanos (Ibid.). En particular, lo que se refiere al impacto causado por el fenómeno de isla de calor urbano se relaciona con los materiales de construcción urbana de cemento, asfalto y cubiertas bituminosas, los cuales poseen una capacidad térmica mayor que los pastos o las tierras de cultivo. Generalmente este tipo de materiales carecen de capacidad de evapotranspiración y, por el contrario, tienden a absorber, almacenar, y emitir

mayor energía térmica a diferencia de los materiales del paisaje natural. Sumado a esto, la morfología urbana y las emisiones de calor residual de la industria, los edificios y las fuentes móviles en las áreas urbanizadas, juegan un papel significativo en la formación de islas de calor urbanas (Oke, 1987 citado en Oberndorfer et al., 2007).

Todavía cabe señalar que múltiples estudios cuyo fin era evaluar el potencial de mitigación de los techos verdes obtuvieron resultados significativos como es el caso de Singapur, allí se realizaron mediciones de la temperatura ambiente a diferentes alturas sobre un techo con vegetación y uno convencional, en este se concluyó que a una altura inferior a 10 m de los edificios los techos verdes pueden llegar a ser más eficaces, también se pudo evidenciar que el efecto de enfriamiento se presenta durante las horas no pico y particularmente desde la tarde hasta el amanecer del día siguiente (Wong et al., 2003 citado en Santamouris, 2014). Adicionalmente en un siguiente estudio para esta misma zona, se realizaron análisis de la temperatura de la superficie antes y después de la colocación de un techo verde, allí se pudo evidenciar una disminución significativa en el momento en el que se instaló el techo verde, especialmente para la cubierta vegetal, lo que hace que la diferencia de temperatura máxima sea de aproximadamente 18 ° C (Wong et al., 2007 citado en Herrera et al., 2017). En conclusión, la mayoría de los estudios de simulación alusivos al tema de techos verdes, indican que en promedio este tipo de infraestructura puede disminuir la temperatura ambiental media de 0.3 a 3 ° C a escala de ciudad y disminuir drásticamente el efecto de isla de calor (Santamouris, 2014).

Con respecto a Colombia se tiene en primera instancia que, al ser un país complejo, biodiverso, pluriétnico y multicultural las soluciones basadas en la naturaleza deben tener en cuenta en el momento de su aplicación, las diferentes escalas espaciotemporales y las dinámicas territoriales, esto con el fin de cambiar paradigmas a partir de la consolidación de sistemas de vida sostenibles y de esta manera se permita fortalecer los procesos de resiliencia en todo el territorio (Rinaudo, 2019). Este mismo autor asegura que las regiones donde se han desarrollado mayor cantidad de proyectos asociados a SBN son los Andes (56,06%), el Amazonas (42,42%) y el Pacífico (40,91%), sin embargo, para el caso específico de los techos verdes Zielinski et al., (2012) afirman que en Colombia, los estudios del ciclo de vida e implementación de este tipo de infraestructuras son escasos y, a pesar de que en muchas partes del mundo ya hay amplias aplicaciones de estos, las características de construcción para Colombia deben ser completamente diferentes debido a su condición climática bimodal.

Como se ha dicho anteriormente en los últimos años los techos verdes se han convertido en un recurso atractivo para garantizar una mejor calidad de vida a los habitantes de las zonas urbanas, esta situación no ha sido ajena a Colombia, a pesar de que no existen muchos a nivel nacional ya hay una pequeña aproximación por parte de diferentes sectores que incentivan su aplicación. Pese a que varía tanto la tecnología como la motivación para implementarlos, existen empresas dedicadas a la venta y el diseño de techos verdes e igualmente fundaciones que trabajan con familias en barrios marginados para que se vean beneficiados con opción tecnológica; y también hay universidades que investigan la factibilidad de esta tecnología en diferentes ciudades del país. Bogotá ha sido la ciudad que más ha desarrollado este tipo de

infraestructuras, según estudios realizados por Camacho (2019) existen 148.033 techos aptos para la implementación de los techos verdes, y se calcula que, si el 3,6% de los techos de Bogotá fueran verdes, se podría capturar el 100% del material particulado de los carros de la ciudad.

El impacto de los techos verdes puede llegar a ser realmente significativo y por ello como antecedente legal para el país, el Concejo de Bogotá en 2009 expidió el acuerdo 418 para “buscar que, en los techos, cubiertas o terrazas de los edificios o inmuebles, se implemente y genere la tecnología de techos verdes, como una alternativa de mejoramiento ambiental, que permita mitigar los impactos negativos de fenómenos naturales que afectan el planeta”. Por último, Avella (2016) citado en Camacho (2019) asegura que un metro cuadrado de techo verde captura el 10% del material articulado de un carro, retiene 50 litros de agua lluvia en un año, compensa el 20% de la huella de carbono de una persona y produce el oxígeno requerido por un ser humano.

Por último, Camacho (2019) asegura que los techos verdes pueden contribuir a múltiples beneficios para las ciudades y sus habitantes. Entre los cuales se encuentran:

- **Mejoras estéticas:** El reverdecimiento urbano ha sido promovido como una estrategia fácil y efectiva para embellecer el entorno construido y aumentar las oportunidades de inversión.
- **Gestión de aguas pluviales:** Con techos verdes, el sustrato almacena el agua, la cual posteriormente es recogida por las plantas desde donde es devuelta a la atmósfera a través de la transpiración y la evaporación. De igual forma los techos verdes actúan como filtros naturales para el agua que se escurre, lo que ayuda a reducir la cantidad de escorrentía de aguas pluviales y retrasa el tiempo en que ocurre la escorrentía, lo que resulta en una disminución de la tensión en los sistemas de alcantarillado en los períodos de flujo máximo.
- **Moderación del efecto de la isla de calor urbano:** Los techos verdes pueden ayudar a reducir la distribución de partículas en toda la ciudad, así como la producción de smog. Esto puede desempeñar un papel en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la adaptación de las zonas urbanas a un clima futuro con veranos más cálidos.
- **Mejora en la calidad del aire:** Las plantas en techos verdes pueden capturar contaminantes en el aire y también filtrar gases nocivos. Los efectos moderadores de la temperatura de los techos verdes pueden reducir la cantidad de **CO₂** y otros subproductos contaminantes que se liberan al aire.
- **Reducción del ruido:** Los techos verdes tienen una excelente atenuación de ruido, especialmente para sonidos de baja frecuencia. Un techo verde extensivo puede reducir el sonido del exterior en 40 decibeles, mientras que un techo verde intensivo puede reducir el sonido en 46-50 decibeles.

- **Aumento de la biodiversidad:** Los techos verdes pueden sostener una variedad de plantas e invertebrados, y proporcionar hábitat para varias especies de aves.
- **Agricultura urbana:** El uso de techos verdes como sitio para un proyecto de agricultura urbana puede reducir la huella de una comunidad mediante la creación de un sistema alimentario local. Estos proyectos pueden servir como fuente de empoderamiento de la comunidad, aumentar la sensación de autosuficiencia y mejorar los niveles de nutrición. **(Pág. 122)**

3. METODOLOGÍA

Este apartado da cuenta de la metodología desarrollada para dar cumplimiento al Objetivo general y los objetivos específicos anteriormente planteados.

Determinar el desempeño de un techo verde en la regulación de temperatura a partir de la implementación de un montaje piloto

Para estimar el efecto de un techo verde en la regulación de temperatura en montajes pilotos, se realizó la construcción de dos unidades de techo, las cuales constan de una base metálica confinada en placas de fibrocemento de 6 mm de uso exterior, y un techo de fibro -cimento en la parte superior. Una de las unidades se usó como control que representan un techo convencional expuesto, mientras que la otra es una primera aproximación de un techo verde, en el cual en la parte superior se ubican las capas de sustrato compuestas por mezcla de arena, cascarilla de arroz, tierra y una capa vegetal de césped (Anexo 1).

Figura 4. *Montaje piloto techo convencional*



Figura 5. *Montaje piloto techo verde*



Para la medición de los datos de temperatura, se utilizó un kit electrónico de Arduino con microprocesador Arduino Uno con sensores de temperatura y humedad relativa, el montaje de los componentes electrónicos se realizó con el acompañamiento del Grupo de Investigación de Ecología, Ingeniería y Sociedad (EIS). En los techos se tomaron datos cada 5 minutos, finalmente la información recolectada se analizó mediante estadística descriptiva, donde se usó la prueba “t” student, la cual sirve para determinar si hay una diferencia significativa entre las medias de dos grupos. Se fundamenta en dos premisas; la primera: en la distribución de normalidad, y la segunda: en que las muestras sean independientes (Sánchez, R. 2015). Esta prueba permitió observar si hubo diferencias significativas entre los techos pilotos y de esta manera determinar si genera una ventaja significativa en techos con este tipo de tecnología verde.

Establecer criterios de selección para zonas de potencial aplicación de techos verdes.

Para dar cumplimiento al presente objetivo, en primera instancia se realizó la revisión de literatura a nivel general sobre los criterios que se deben de tener presentes al momento de implementar infraestructuras verdes, posteriormente se realizó un filtro de información enfocado a los estudios a nivel nacional, entre estos fueron seleccionados 4 documentos los cuales presentaban mayor similitud con la presente investigación. Como resultado de esta revisión surgieron criterios medioambientales, técnicos del inmueble, técnicos del techo verde y de normativa territorial, los cuales fueron dispuestos en la tabla 2.

De acuerdo con los alcances del presente proyecto y al perfil del administrador ambiental se tuvieron en cuenta únicamente algunos criterios medioambientales y de normativa territorial. Para determinar la importancia de los criterios medioambientales se usó una matriz de selección tipo semáforo (ver tabla 3); con respecto a los criterios de normativa territorial se realizó una adaptación a juicio propio de las autoras de este trabajo de acuerdo con las condiciones de ordenamiento locales.

Evaluar la viabilidad del uso de techos verdes en 3 comunas de la ciudad de Pereira a partir de los resultados obtenidos en los criterios de selección.

Para evaluar la viabilidad del uso de techos verdes en la ciudad de Pereira se seleccionaron 3 comunas mediante el software Google Earth donde se delimitaron por medio de polígonos. Posteriormente, se realizó la revisión de las condiciones climáticas de la ciudad, a través de imágenes satelitales facilitadas por el grupo de investigación EIS, las cuales se analizaron a partir del Software “R” contrastando estas imágenes con los polígonos de las comunas seleccionadas.

Como resultado del proceso anterior se obtuvieron imágenes satelitales del Índice Diferencial Normalizado de Vegetación (NDVI), a partir del cual se estimó la temperatura superficial según el siguiente procedimiento:

El cálculo de la temperatura de la superficie puede ser calculado a partir de la información de la banda 10 del infrarrojo termal del sensor TIRS. Para calcular la temperatura se usa la fórmula 1 :

$$LST(^{\circ}C) = Bt [1 + (w * Bt p) * \ln(e)] - 273.15$$

Donde: Bt is la temperatura atmosférica calculada por el satélite

w es la longitud de onda de la radiación emitida

p es $h * c/s$, donde h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz, s la constante de Boltzman. p es entonces igual a 14388

e es la emisividad electromagnética.

Para áreas urbanas se usa la fórmula de Stathopolou et al. (2007)

$$e = 0.17 * PV + 0.963$$

En la fórmula anterior PV es la proporción de vegetación que se calcula a partir del NDVI, según:

$$PV = [(NDVI - NDVImin) (NDVImax - NDVImin)]^{1/2}$$

El cálculo de estas fórmulas se implementó por el grupo de investigación EIS en el software R, para el cálculo de la temperatura superficial en Pereira y Dosquebradas.

A partir de esto se realizó un análisis para las comunas delimitadas y se concluyó con la propuesta de aplicación del protocolo de criterios establecidos para la selección de zonas aptas para la implementación de techos verdes como estrategia de adaptación a nivel local frente al cambio climático.

4. RESULTADOS

Determinar el desempeño de un techo verde en la regulación de temperatura a partir de la implementación de un montaje piloto

Los montajes de los dos techos pilotos fueron ubicados en predios de la vereda de Mundo Nuevo, el periodo de tiempo de medición fue corto, sin embargo, la toma de datos cada 5 minutos permitió contar con una base de datos amplia que posibilitó realizar un análisis acertado. Para llevar a cabo la prueba “t” student y de acuerdo con las mediciones obtenidas, se trabajó con una muestra de 30 datos, correspondientes a las temperaturas máximas registradas en el periodo de tiempo de evaluación.

Tabla 1. *Datos resumen de la estadística descriptiva de las temperaturas y humedad relativa*

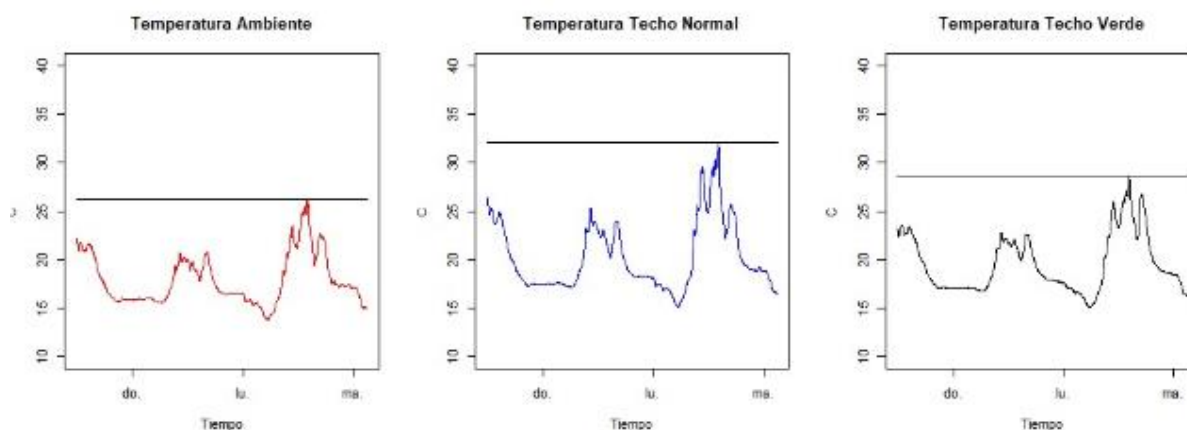
	HR Ambiente	HR Normal	HR Techo Verde	Temp. Ambiente	Temp. Normal	Temp. Techo Verde
Promedio	97.06	99.90	99.66	17.95	20.32	19.59
Máximo	99.90	99.90	99.90	26.20	32.10	28.60
Mínimo	70.60	99.90	92.40	13.70	15.10	15.10

El resultado de dicha prueba (Figura 6) permitió rechazar la hipótesis nula, ya que el valor de t (12,42) es mayor al nivel de significancia (0,05) encontrándose en la región crítica para una prueba de dos colas. Por ende, se puede afirmar que existe una diferencia significativa entre las temperaturas del techo normal y el techo verde.

Figura 6. Resultado prueba *t* student en Excel.

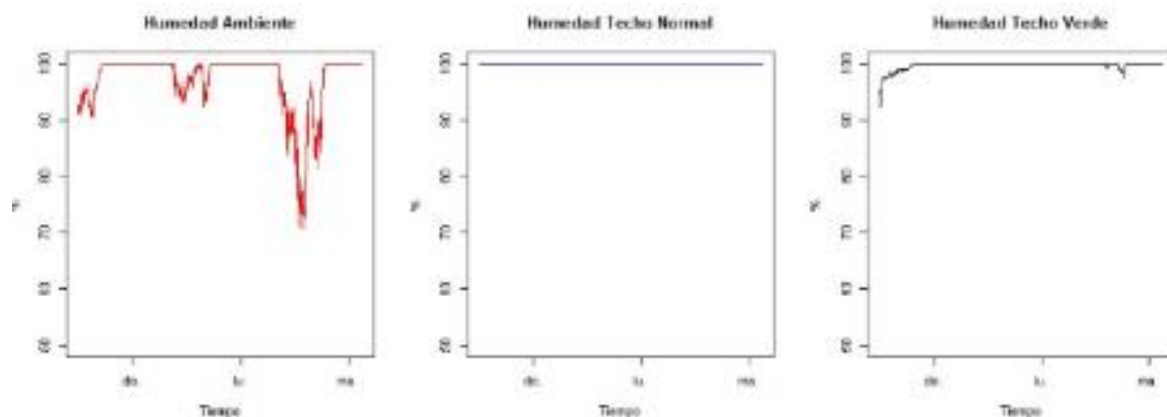
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales		
	TMAX_Normal	TMAX_Verde
Media	29,67	26,24
Varianza	0,88	1,41
Observaciones	30	30
Varianza agrupada	1,14	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	58,00	
Estadístico t	12,43	
P(T<=t) una cola	0,0000000000000000027	
Valor crítico de t (una cola)	1,67	
P(T<=t) dos colas	0,0000000000000000053	
Valor crítico de t (dos colas)	2,00172	

En coherencia con lo anterior, también se puede observar en el Gráfico 1 que el techo verde aún sin madurar logra una disminución de temperatura de 4 °C aproximadamente en comparación con el techo normal en la medición de las temperaturas máximas.

Gráfico 1. Variación de la temperatura ambiental y temperatura interior de módulos con techo normal y techos verdes.

En el caso de la humedad relativa no se notan diferencias de importancia en el sentido de que en ambos casos se tienen valores elevados. Esto se debe a que las mediciones se realizaron con los recintos cerrados, por lo tanto, el techo verde no influye significativamente en la condición de humedad del recinto (ver gráfico 2).

Gráfico 2. Variación de la humedad relativa ambiental y humedad relativa interior de módulos con techo normal y techos verdes.



Establecer criterios de selección para zonas de potencial aplicación de techos verdes

Los estudios que fueron revisados para analizar los criterios de selección en el caso puntual de Colombia fueron los siguientes:

- Propuesta de Guía para la Implementación de techos verdes en la ciudad de Chiquinquirá (Boyacá).
- Caracterización de la infraestructura verde a nivel local con sistemas de información geográfica, Tunja (Colombia).
- Propuesta metodológica para identificar la ubicación de techos verdes a microescala usando GIS y cuantificación de la reducción de PM10 caso de estudio Bogotá (Colombia).
- Guía de techos verdes en Bogotá

En estos estudios se lograron identificar múltiples criterios de selección, los cuales se componen de criterios medioambientales, técnicos de los inmuebles y técnicos de la cobertura verde, en la siguiente tabla se realizó una recopilación de cada uno de los criterios usados en los casos de estudio anteriormente mencionados.

Tabla 2. *Resumen criterios casos de estudio nacionales*

CRITERIOS			
CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES	CRITERIOS TÉCNICOS INMUEBLE	CRITERIOS TÉCNICOS DEL TECHO VERDE	CRITERIOS ENFOCADOS EN EL ORDENAMIENTO TERRITORIAL
Intensidad y duración de exposición solar	Estrategias anti-erosión por deslizamiento y viento para sistemas de techo verde plano e inclinados		Multifuncionalidad
Precipitación anual y mensual	Norma sísmica vigente en la construcción	Tipo o sistema constructivo de la cubierta	Accesibilidad de la población
Intensidad de lluvia	Pendiente Requerida	Pendiente de la cubierta	Estado ecológico
	Manejo de aguas lluvias	Servicios ambientales	Conectividad ecológica
Temperatura	Capacidad de carga de la estructura de soporte	Distancia de las cubiertas a colectores naturales de escorrentía	Ubicación del techo con respecto a cuencas y subcuencas principales
Humedad relativa	Cercanía de las cubiertas a zonas con múltiples alertas de falla del alcantarillado	Estanqueidad	Distancias de las cubiertas a colectores naturales de escorrentía
Frecuencia dominante del viento	Accesibilidad a la cubierta	Drenaje	Cercanía de la cubierta a zonas con múltiples alertas de falla del alcantarillado
Velocidad del viento	Uso del inmueble	Retención de agua	
Mes del año con mayor número de días de lluvia	Localización y fecha de construcción del inmueble	Consistencia	

Mes del año con menor Número de días de lluvia	Área a intervenir	Filtración	
Requerimientos hídricos	Periodo de vida útil	Durabilidad	
Periodos de sistemas de sequía	Integridad del inmueble	Estabilidad	
Fauna y Flora del área	Área de las cubiertas	Espesor del sustrato	
Insolación Anual	Estructura del edificio según su ubicación	Altura del sistema	
Nubosidad por meses	Ubicación del techo respecto a cuencas y subcuencas principales	Tipo de vegetación	
Conectividad ecológica		Inclinación de la cubierta	
Variabilidad espacial de la lluvia		Peso saturado del agua	
Confort térmico		Capacidad de retención del agua	
		Carga total del sistema	
		Costos	

Nota. Esta tabla muestra los criterios propuestos en los estudios de caso analizados anteriormente.

En la siguiente tabla se pueden observar los criterios medioambientales seleccionados cuyo fin es generar una primera aproximación para la zona de estudio que requiera la aplicación de este tipo de tecnologías.

Tabla 3. *Explicación importancia de selección.*

Estos criterios se encuentran dentro del alcance del perfil del Administrador Ambiental y son criterios generales usados para lograr una primera aproximación al caso de estudio de techos verdes para la ciudad de Pereira	Estos criterios tienen el potencial para ser usados en futuras investigaciones que requieran mayor detalle	Están fuera del alcance de la presente investigación

Nota. Esta tabla presenta la información a tener en cuenta al momento de evaluar cada criterio para ser seleccionado.

Tabla 4. *Matriz de selección tipo semáforo.*

LISTADO CRITERIOS MEDIOAMBIENTALES PARA ZONAS DE POSIBLE IMPLEMENTACIÓN			
Criterio	Importancia		
Intensidad y duración de exposición solar		X	
Precipitación anual y mensual	X		
Intensidad de lluvia		X	
Temperatura	X		
Humedad relativa	X		
Frecuencia dominante del viento			X
Velocidad del viento			X
Mes del año con mayor número de días de lluvia		X	
Mes del año con menor Número de días de lluvia		X	

Requerimientos hídricos			X
Periodos de sistemas de sequía			X
Fauna y Flora del área		X	
Insolación Anual		X	
Nubosidad		X	
Conectividad ecológica	X		
Variabilidad espacial de la lluvia			X
Confort térmico			X

Nota. Esta tabla presenta los criterios medioambientales que fueron seleccionados y evaluados para efectos de la presente investigación.

No solo se deben tener en cuenta criterios medioambientales en el momento de hacer la selección de zonas de posible implementación de techos verdes, sino que también es necesario el análisis de criterios enfocados en el ordenamiento territorial, que permitan facilitar la toma de decisiones entorno a las acciones encaminadas a la adaptación del cambio climático. A continuación, se enlistan los criterios que se tuvieron en cuenta para la presente investigación:

1. **Normativa de construcción:** Este criterio va a permitir delimitar las zonas que no presenten riesgo en su infraestructura o que puedan verse afectadas con la instalación de un techo verde. Se hace necesario que los demás criterios propuestos se contrasten con este para que de esta forma se logre una aproximación mayor a las posibles zonas de aplicación.
2. **Ubicación del techo con respecto a la Estructura Ecológica Complementaria:**

La Estructura Ecológica Complementaria (EEC), debido a sus características contribuye en la prestación de servicios ambientales y especialmente en las zonas con desarrollo urbano permite fortalecer y proporcionar conectividad a la Estructura Ecológica Principal. La EEC está compuesta por el espacio público construido como los parques, que posean algún interés ambiental, es decir, que enmarquen en su interior componentes naturales que brindan servicios ambientales a las zonas aledañas, y por los corredores de conectividad que brindan el flujo de materia y energía entre diferentes hábitats. (POT, 2015).

De acuerdo con lo anterior, es necesario tener en cuenta este criterio en el momento de selección de zonas de posible aplicación de techos verdes, ya que no tendrían un impacto significativo diferencial en zonas aledañas a corredores ambientales o parques, puesto que la medida de mitigación y adaptación está siendo desarrollada por los corredores biológicos.

3. **Ubicación del techo con respecto a cuencas y subcuencas principales con historial de inundación:** Los techos verdes además de contribuir a la disminución de la temperatura, cuentan con la capacidad de mitigar los impactos asociados a la precipitación que genera escenarios de riesgo por inundación. Su ubicación respecto a cuencas y subcuencas principales se hace importante para la regulación de caudales en la época de invierno principalmente.

Evaluar la viabilidad del uso de techos verdes en 3 comunas de la ciudad de Pereira a partir de los resultados obtenidos en los criterios de selección.

Las comunas seleccionadas para evaluar la viabilidad del uso de techos verdes fueron las comunas Centro (1), Olímpica (2) y San Joaquín (3) ver Figura 7.

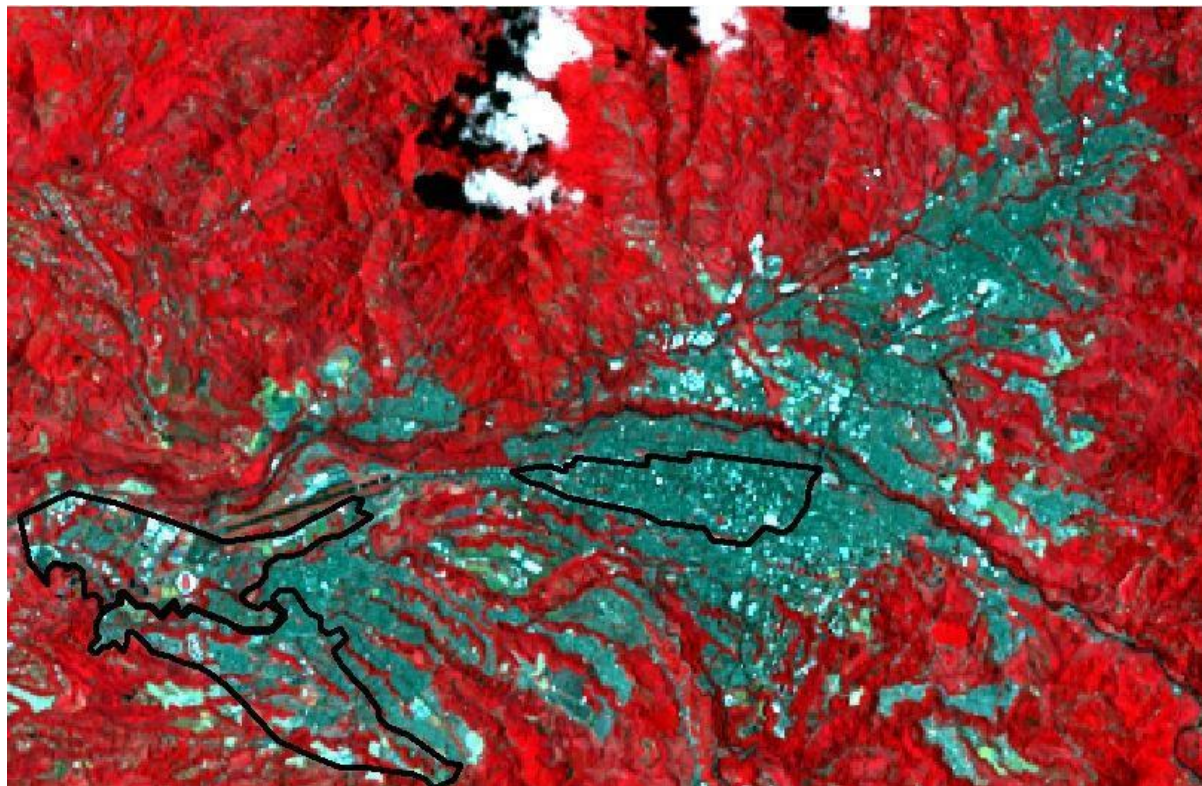
Figura 7. Imagen comunas de la ciudad de Pereira priorizadas



Como se dijo anteriormente, las islas de calor urbano son un fenómeno térmico que se desarrolla en áreas urbanas debido al cambio en la cobertura de vegetación natural a asfalto, lo cual genera una diferencia de temperatura entre las zonas más densamente pobladas y sus alrededores, esto puede representar el aumento de la temperatura en zonas determinadas, por ejemplo, la zona centro de una ciudad puede tener entre 5-10°C más que los alrededores (Globe, 2005). Para contrastar dicha información con la presente investigación, el Grupo EIS de la UTP ha realizado diferentes estudios a partir del uso de imágenes satelitales e información climática de la zona urbana de la ciudad de Pereira.

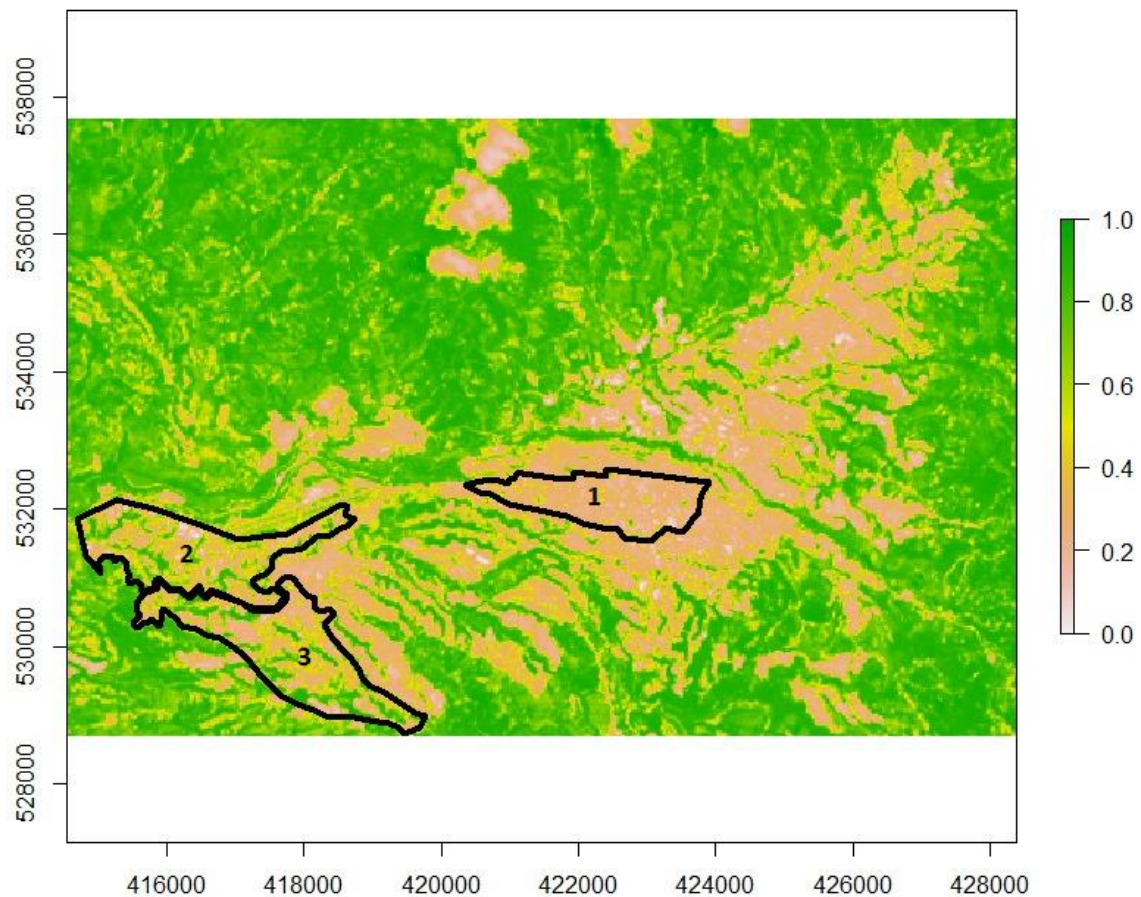
La figura 8 hace uso de las bandas del infrarrojo para discriminar las zonas con vegetación en rojo de la zona urbana de Pereira y Dosquebradas

Figura 8. *Imagen zona urbana de Pereira y Dosquebradas. LANDSAT 8 5 de septiembre de 2019*



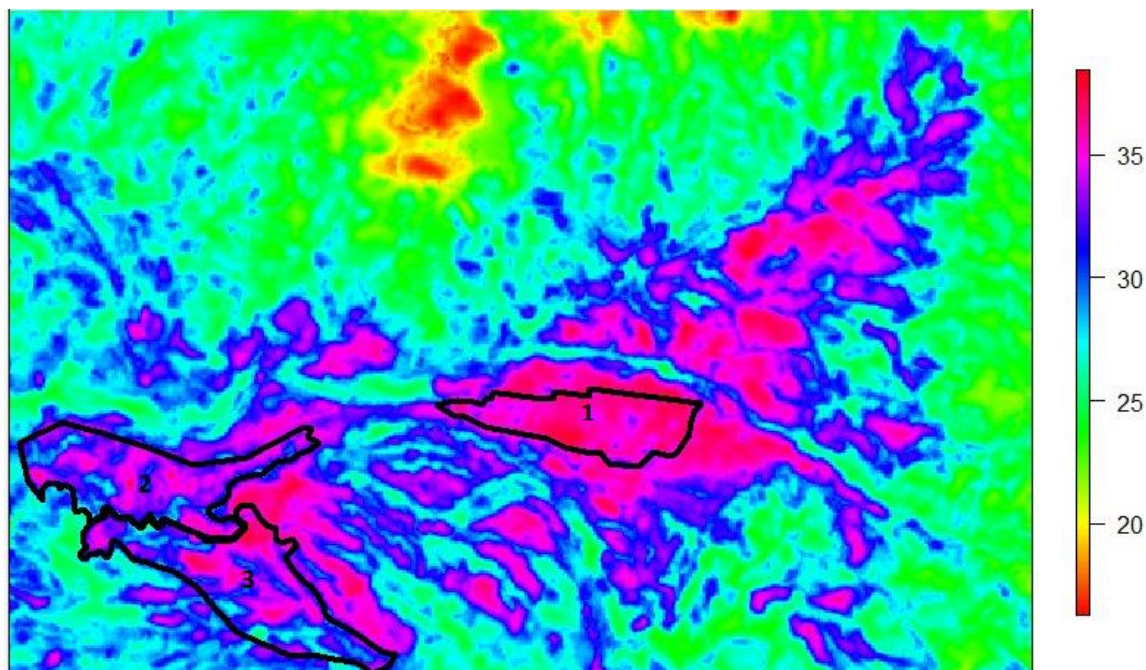
A partir de la imagen satelital anterior se calculó el índice de Vegetación Ajustado al Suelo Modificado (NDVI) en el cual se identificaron las zonas con vegetación en verde (Ver figura 9). Allí se pudo observar que la comuna Centro carece de vegetación significativa, mientras que las comunas Olímpica y San Joaquín se perciben franjas de vegetación asociadas principalmente con quebradas urbanas.

Figura 9. Imagen satelital del Índice de Vegetación Ajustado al Suelo Modificado del casco urbano de la ciudad de Pereira.



A partir de los valores NDVI se calculan las temperaturas superficiales que se muestran en la Figura 10, del satélite Landsat 8, tomada el 5 de septiembre de 2019, cabe señalar que la temperatura superficial es la temperatura radiante de la superficie terrestre, incluyendo hierba, suelo desnudo, carreteras, aceras, edificios y árboles, etc (Protocolo de temperatura superficial, 2005). Los lugares más calientes, están representados por los colores entre azul oscuro y fucsia, son sitios con mucho pavimento, tales como la comuna Centro (1) donde se encuentran los edificios administrativos y económicos más importantes, y las comunas Olímpica (2) y San Joaquín que se caracterizan por ser zonas altamente urbanizadas y que debido a su ubicación geográfica presentan altas temperaturas.

Figura 10. *Imagen satelital de temperatura superficial del casco urbano de la ciudad de Pereira.*



Al analizar las imágenes satelitales anteriormente descritas, se puede apreciar que gran parte del área de las comunas Centro (1), Olímpica (2) y San Joaquín (3) presentan el NDVI por debajo de 0.6, lo cual indica que estas zonas presentan muy poca cobertura vegetal y en coherencia con esto son las zonas que muestran la temperatura superficial con un rango más elevado. Es por esto que para la presente investigación se hizo pertinente tomar estas tres comunas como caso de estudio, las cuales al presentar altas temperaturas por lo anteriormente mencionado y debido a un acelerado crecimiento urbanístico, podrían a largo plazo verse más afectadas en cuestión de calidad de vida frente a las consecuencias de los fenómenos climáticos extremos. Teniendo delimitadas estas comunas como posibles zonas viables para la implementación de techos verdes, se propone entonces que adicional a los datos encontrados de temperatura superficial y cobertura vegetal, se realice el protocolo de criterios establecidos por este trabajo en relación con el ordenamiento territorial: *Normativa de construcción, Ubicación del techo con respecto a la Estructura Ecológica Complementaria y Ubicación del techo con respecto a cuencas y subcuencas principales con historial de inundación*, a partir de herramientas de SIG, lo cual va a permitir filtrar las zonas dentro de las comunas que sean aptas para el uso de techos verdes que se convierten en una estrategia de adaptación al cambio climático a nivel local.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para concluir, es importante resaltar que la construcción de los techos piloto fue una aproximación a la funcionalidad de estos y que las mediciones analizadas en este trabajo corresponden al periodo previo a la maduración de la vegetación del techo verde, por lo cual se pueden presentar resultados con diferencias más notorias si se estudia un periodo de tiempo más prolongado o se realizan ajustes más técnicos a los montajes de acuerdo con objetivos diferentes. En nuestro caso, a partir de las mediciones de los techos y a la prueba “t” student, se puede afirmar que sí existe una diferencia significativa entre los techos pilotos en cuanto a sus temperaturas máximas y que, por ende, los techos verdes generan una ventaja sostenible frente a las nuevas condiciones climáticas.

Ante esta situación, los techos verdes podrían aportar a solucionar el déficit de zonas verdes en la ciudad, ya que este tipo de tecnología presenta múltiples beneficios en cuanto a servicios ecosistémicos y contribuyen a la conectividad ecológica de la ciudad. Además, se hacen necesarios debido a que el territorio se ha ido densificando cada día más y las zonas verdes y arborizadas han pasado a ser zonas duras, a su vez, la calidad del bosque urbano existente es insuficiente y no cuenta con las condiciones adecuadas de manejo.

Hay que mencionar, además, que a partir de la revisión de literatura se pudo asegurar, que este tipo de tecnología verde para el contexto nacional colombiano no cuenta con criterios unificados para su implementación, pues diferentes estudios dan cuenta de múltiples criterios que son susceptibles a ser utilizados según las condiciones geográficas y la necesidad de implementación. Cabe señalar que, los criterios escogidos en la presente investigación se basan en una primera aproximación de este tipo de tecnologías en la región, sin embargo, a futuro dichos criterios pueden ser modificados en busca de otros beneficios o casos más específicos. Por último, como recomendación de la presente investigación para posteriores proyectos, se sugiere que, para tener mayor precisión al momento de seleccionar zonas de implementación, la información de los criterios medioambientales y de ordenamiento territorial se manifiesten mediante capas que se puedan superponer en herramientas SIG.

Finalmente, mediante este trabajo es posible reafirmar la importancia del rol del administrador ambiental para llevar a cabo acciones con el potencial de determinar el curso futuro del clima, mediante un trabajo interdisciplinario que permita aportar a la mejora de la sostenibilidad del territorio y sus sectores económicos, mediante la innovación y adaptación a los nuevos requerimientos del orden mundial en favor de las futuras generaciones.

6. REFERENCIAS

Alcaldía de Bogotá. (2011). *Guía de techos verdes en Bogotá*. http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/73753/GUIA+DE+TECHOS+VERDES_2011.pdf

Alcaldía de Pereira. (2016). Plan de desarrollo municipal de Pereira “*Pereira capital del eje 2016 - 2019*”. <http://www.pereira.gov.co/transparencia/planeaciongestionycontrol/plan%20de%20desarrollo%202016-2019.pdf>

Alcaldía de Pereira. (2020). *Pereira cómo vamos: Informe de calidad de vida*. https://s3.pagegear.co/38/75/icv2020_completo.pdf

Alcaldía de Pereira. (2020). Plan de desarrollo municipal de Pereira “*Gobierno de la ciudad capital del eje 2020-2023*”. <http://www.pereira.gov.co/NuestraAlcaldia/Documents/Plan%20de%20Desarrollo%202020-2023%20definitivo%20v8%20.pdf>

Barcia Sardiñas, S., Guevara Velazco, A., Estrada Legrá, Y. y Otero Martín, M. (2021). Climatic extremes by heat. *Revista Cubana de Meteorología*, 27(1). <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/555/1020#B66>

BID (Banco Interamericano de Desarrollo). (2010). *Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático - Diagnóstico inicial, avances, vacíos y potenciales líneas de acción en Mesoamérica*. http://euroclimaplus.org/images/Publicaciones/Vulnerabilidad/CA-BID-Vulnerabilidad_y_adaptacion_al_cambio_climatico.pdf

Boche, S., Guillén, L., Silva, M. (2019). Incidencia del Cambio climático en la salud. [Tesis para optar al título de especialistas en MGI]. Forum estudiantes ciencias médicas. <http://www.forumestudiantilcienciasmedicas.sld.cu/index.php/forum/2020/paper/viewFile/38/37>

Camacho, P., Espitia, W. (2019). Propuesta de Guía para la Implementación de techos verdes en la ciudad de Chiquinquirá - Boyacá. [Universidad Santo Tomás]. Repositorio institucional de la Universidad Santo Tomás. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/31313>

CARDER (Corporación Autónoma Regional de Risaralda). (2020). *Plan de acción cuatrienal 2020-2023 Risaralda sostenible y resiliente, compromiso de todos*. <https://www.carder.gov.co/download/plan-de-accion-cuatrienal-2020-2023-risaralda-sostenible-y-resiliente-compromiso-de-todos/>

CARDER (Corporación Autónoma Regional de Risaralda). (2013). *Plan departamental de gestión del cambio climático Risaralda*. https://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/aproximacion_al_territorio/Plan_Adaptacion_Cambio_Climatico_RISARALDA.pdf

Cardona, A. (2009). Mapeo institucional. Actores relacionados con el abordaje del cambio climático en Colombia. Proyecto Integración de riesgos y oportunidades del cambio climático en los procesos nacionales de desarrollo y en la programación por países de las Naciones Unidas. PNUD. http://origin.portalces.org/sites/default/files/migrated/docs/PNUD_-_Mapeo_institucional_Actores_relacionados_con_el_abordaje_del_C.C_en_Colombia.pdf

CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). (2015). *Adaptación al cambio climático en América Latina y el Caribe*. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39842/1/S1501318_es.pdf

Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C. and Maginnis, S. (eds.) (2016). *Nature-based Solutions to address global societal challenges*. UICN. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2016-036.pdf>

Contreras Escandón, C. (2017). Superar la sostenibilidad urbana: una ruta para América Latina. *Revista Bitácora Urbano Territorial*, 27(2), 27-34. <https://www.redalyc.org/pdf/748/74850863004.pdf>

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. Artículo # 9 de mayo de 1992. https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/convsp.pdf

Departamento Nacional de Planeación. (2011). *CONPES 3700*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3700.pdf>

Díaz Cordero, G. (2012). El cambio climático. *Ciencia y sociedad*, 37 (2), 227-240. <http://repositoriobiblioteca.intec.edu.do/bitstream/handle/123456789/1392/CISO20123702-227-240.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Earth Observing System. (s.f.). Índice de Vegetación Ajustado al Suelo Modificado (NDVI). <https://eos.com/es/industries/agriculture/msavi/>

Fernández García, F. y Rasilla Álvarez, D. (2008). Olas de calor e influencia urbana en Madrid y su área metropolitana. *Estudios Geográficos*, 69(265), 495-518. <http://estudiosgeograficos.revistas.csic.es/index.php/estudiosgeograficos/article/view/96/93>

Hernandez, C., Sanabria, R. (2019) Caracterización de la infraestructura verde a nivel local con sistemas de información geográfica. Tunja, Colombia. *Revista Facultad de Ingeniería de la UPTC*. <https://utp-ambientalex-info.ezproxy.utp.edu.co/articulo/detalle/caracterizacion-de-la-infraestructura-verde-a-nivel-local-con-sistemas-de-informacion-geografica-9140/pdf>

Herrera Gómez, S., Quevedo Nolasco, A. y Pérez Urrestarazu, L. (2017). The role of greenroofs in climate mitigation. a case study in Sevilla, Spain. *Building and Environment*, 123, 575-584. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132317303359#bib14>

IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). (2012). *Características y tendencias a largo plazo de las olas de calor y de frío en Colombia*. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Oleadas+de+Calor+y+Frio.pdf/4330fcf3-a062-42bf-b7f3-c648227fb66d>

IPCC. (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. IPCC. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2020/02/ar4-wg2-sum-vol-sp.pdf>

IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. IPCC. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (s.f.). *Cambio Climático*. Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. <http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/cambio-climatico>

Lampis, A. (2013). La adaptación al cambio climático: el reto de las dobles agendas, Cambio climático, movimientos sociales y políticas públicas una vinculación necesaria (1era ed). Alfabeta Artes Gráficas.

Lee, J., Kim, J. y Lee, M. (2013). Mitigation of urban heat island effect and greenroofs. *Sage Journals*, 23(1), 62-69. <https://journals-sagepub-com.ezproxy.utp.edu.co/doi/10.1177/1420326X12474483>

Lezama, J. y Domínguez, J. (2006). Medio ambiente y sustentabilidad urbana. *Papeles de población*, 12(49), 153-176.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-74252006000300007

Lin, BS., Yu, CC., Su, AT. y Lin, YJ. (2013). Impact of climatic conditions on the thermal effectiveness of an extensive green roof. *Building and Environment*, 67, 26-33.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132313001376#bib16>

Magdaleno Mas, F., Cortés Sánchez, F. y Molina Martín, B. (2018). Infraestructuras verdes y azules: estrategias de adaptación y mitigación ante el cambio climático. *Revista Digital Del Cedex*, (191), 105-112. <http://ingenieriacycivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2350#sec-2>

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2012). *Plan nacional de adaptación al cambio climático*. <https://www.minambiente.gov.co/index.php/plan-nacional-de-adaptacion-al-cambio-climatico-pnacc/plan-nacional-de-adaptacion-al-cambio-climatico-pnacc>

Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (2008). *Política de gestión ambiental urbana*. https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Polit%C3%ACcas_de_la_Direcci%C3%B3n/Politica_de_Gestion_Ambiental_Urbana.pdf

Moreno García, M. y Serra Pardo, J. (2016). El estudio de la isla de calor urbana en el ámbito mediterráneo: una revisión bibliográfica. *Revista bibliográfica de geografía y ciencias sociales*. 21 (1.179). <http://www.ub.edu/geocrit/b3w-1179.pdf>

Moreno Suárez, M. (2008). La gestión ambiental urbana. El caso de la contaminación atmosférica en Bogotá. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, (62), 29-39. <https://www.redalyc.org/pdf/206/20611457003.pdf>

Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Köhler, M., Liu, K., y Rowe, B. (2007). Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. *BioScience*, 57(10), 823–833. <https://academic.oup.com/bioscience/article/57/10/823/232363>

Globe. (2005). Protocolo de temperatura superficial. <https://www.globe.gov/documents/16257217/17240639/Protocols+de+Temperatura+Superficial/3bc6d996-de55-4c22-8a47-8160f6609b52#:~:text=La%20temperatura%20superficial%20se%20mide,las%20medidas%20de%20temperatura%20superficial.>

Quirama, D. (2014). Propuesta metodológica para identificar la ubicación de techos verdes a macro-escala usando GIS y cuantificación de la reducción de PM10. Caso de estudio: Bogotá

- Colombia. [Tesis para optar al título de ingeniero ambiental, Universidad de los Andes]. Repositorio institucional de la Universidad de los Andes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/16419/u686648.pdf?sequence=1>

Rinaudo Manucci, M. (2019). Diseño de un portafolio de soluciones basadas en la naturaleza y gestión del cambio climático en un contexto de transiciones socioecológicas hacia la sostenibilidad en Colombia. [Tesis de Maestría, Universidad Externado de Colombia] https://bdigital.ueexternado.edu.co/bitstream/001/2249/1/DQA-spa-2019-Disenio_de_un_portafolio_de_soluciones_basadas_en_la_naturaleza_y_gestion_del_cambio_climatico

Sánchez, R. (2015). t-student Usos y abusos. *Revista Mexicana de Cardiología*, Vol.26 no.1 http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-21982015000100009

Santamouris, M. (2014). Enfriar las ciudades: una revisión de las tecnologías de mitigación de techos verdes y reflectantes para combatir la isla de calor y mejorar el confort en entornos urbanos. *Energía solar*, Vol 103, 682 - 703. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X12002447?via%3Dihub>

Stathopoulou, M., Cartalis, C., & Petrakis, M. (2007). Integrating Corine Land Cover data and Landsat TM for surface emissivity definition: application to the urban area of Athens, Greece. *International Journal of Remote Sensing*, 28(15), 3291-3304

Scott, M. (2006). Beating the heat. Earth Observatory, National Aeronautics and Space Administration. <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/GreenRoof/>

Soto Estrada, E. (2019). Estimación de la isla de calor urbana en Medellín, Colombia. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 35(2), 421-434. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992019000200421

Vásquez, A. (2016). Infraestructura verde, servicios ecosistémicos y sus aportes para enfrentar el cambio climático en ciudades: el caso del corredor ribereño del río Mapocho en Santiago de Chile. *Revista de geografía Norte Grande*, (63), 63-86. https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-34022016000100005&script=sci_arttext

Zielinski, S., García, M., Vega, J. (2012). Techos verdes: ¿Una herramienta viable para la gestión ambiental en el sector hotelero del Rodadero, Santa Marta?. *Gestión y Ambiente*, 15(1),91-104. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169424101008>

